AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE MICROCONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA APLICAÇÃO EM REPAROS ESTRUTURAIS

MAYARA SILVA DE ALMEIDA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO/2024

AVALIAR AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE MICROCONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA APLICAÇÃO EM REPAROS ESTRUTURAIS

MAYARA SILVA DE ALMEIDA

“Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO/2024

FICHA CATALOGRÁFICA
UENF - Bibliotecas
Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

A447 Almeida, Mayara Silva de.

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE MICROCONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA APLICAÇÃO EM REPAROS ESTRUTURAIS / Mayara Silva de Almeida. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

148 f.
Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2024.
Orientador: Sergio Luis González Garcia.

1. Concreto autoadensável . 2. reologia. 3. resíduo de rocha ornamental. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 624

AVALIAR AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE MICROCONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA APLICAÇÃO EM REPAROS ESTRUTURAIS

MAYARA SILVA DE ALMEIDA

"Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil".

Comissão examinadora

_____

Prof. José Maria Franco de Carvalho (D.Sc., Engenharia Civil) - UFV

_____

Prof. Niander de Aguiar Cerqueira (D.Sc., Engenharia Civil) - UENF

_____

Prof. Sergio Luis González Garcia (D.Sc., Engenharia Civil) – UENF (Orientador)

_____

Prof. Rances Castillo Lara (D.Sc., Engenharia Civil) - UENF (Coorientador)

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO/2024

Tudo tem seu tempo determinado, e há tempo para todo propósito de baixo do céu.

Eclesiastes 3:1

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo carinho amor e cuidado, por iluminar todo o meu caminho e prover todos os recursos para essa conquista.

Aos meus pais por não medirem esforços para me ver sorrindo, pelo amor incondicional, meu pai por me fazer sentir capaz e minha mãe por ser meu anjo, amiga, companheira, viver comigo todos os meus momentos de lágrimas, preocupações e alegrias.

Ao meu orientador professor Sergio Luis González Garcia, pelos ensinamentos, confiança, disponibilidade e exemplo de amor à docência.

Ao meu coorientador professor Rances Castillo Lara.

Aos meus colegas da Pós-graduação que foram meus companheiros nessa conquista.

Aos meus pastores, as irmãs Núbia, Lenir e Rute que sempre oraram por mim.

A todos os professores da Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

Ao Jedson por toda paciência e ajuda neste trabalho.

A empresa Eltech por ter sido fornecedora e doadora dos aditivos superplastificante e modificador de viscosidade que foram utilizados na pesquisa.

Ao professor Alexandre Estumbo (LCQUI/UENF), pela disponibilidade e paciência em ajudar com o de superfície específica do resíduo de rocha ornamental e do cimento.

Ao Renan do LAMAV que cortou os meus corpos de prova.

Ao professor Afonso por deixar eu utilizar o laboratório do tijolinho (LAMAV) e o Jhonata por fazer os ensaios de resistência à compressão e tração.

A Natalina que trabalha na empresa Fertimar, ela sempre me aconselhou.

Gostaria de expressar minha gratidão aos técnicos André e Vanúzia pelo comprometimento demonstrado na condução dos testes de granulometria da areia, espectrometria de Florescência de Raios X e massa específica.

Ao técnico de laboratório José Renato, por toda disponibilizada e ajuda nos ensaios de resistência à compressão e tração.

Quero expressar minha gratidão a todos os colabores do LECIV/UENF, em particular as auxiliares de limpeza, porteiros e seguranças. Proporcionaram um ambiente de trabalho agradável e contribuíram para tornar o meu dia no campus mais animado.

Aos motoristas do setor de transporte da UENF.

À UENF pelo financiamento da pesquisa.

Aos membros da banca examinadora pelo tempo dispendido neste trabalho e por todas as contribuições.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 18
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 18
1.2. OBJETIVO GERAL 19
1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 19
1.3. JUSTIFICATIVAS 20
1.4. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO 21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
2.1. MICROCONCRETO 22
2.2. CRONCRETO AUTOADENSÁVEL 22
2.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO FRESCO 24
2.4. PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO ENDURECIDO 25
2.5. DURABILIDADE DO CAA 26
2.6. MÉTODOS DE DOSAGEM 26
2.6.1. MODELO DE FURNAS 27
2.6.2. MODELO DE ANDREASEN 28
2.6.3. MODELO DE ALFRED 29
2.6.4. MÉTODO DE DOSAGEM DE OKAMURA E OUCHI 40
2.6.5. MÉTODO EFNARC 43
2.6.6. MÉTODO DE DOSAGEM PETERSON, BILLBERG E VAN 45
2.6.7. CRITÉRIOS PARA A CONSTRUÇÃO 46
2.7. ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO 47
2.8. REPARO COM MICROCONCRETO AUTOADENSÁVEL 47
2.9. EXEMPLOS DE ESTUDOS COM RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS INCORPORADOS EM CONCRETO 48
2.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS 67
3. MATERIAIS E MÉTODOS 68
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 68
3.2. MATERIAIS 69
3.2.1. BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO DE GRANITO 70
3.3. MÉTODOS DE ENSAIOS 72

3.3.1. ENSAIO DE GRANULOMETRIA DA AREIA 72
3.3.2. ENSAIO DE MASSA UNITÁRIA DA AREIA. 74
3.3.3. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA - MÉTODO DO PICNÔMETRO 75
3.3.4. MODELO DE BRUNEAUER EMMETT E TELLER (BET) 77
3.3.5. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X 78
3.3.6. ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO X (DRX) 79
3.4. METÓDO DE DOSAGEM 79
3.4.1. CURVA DE ANDREASSEN MODIFICADA (ALFRED) 79
3.4.2. MINI SLUMP 80
3.5. ENSAIOSDO MICROCONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO FRESCO 81
3.5.1. ENSAIO DE ESPALHAMENTO (*SLUMP FLOW TEST*) 82
3.5.2. FUNIL V (*V FUNNEL)* 83
3.5.3. ANEL J (*J RING*) 84
3.5.4. ENSAIO CAIXA L (*L BOX*) 85
3.6. ENSAIOS DO MICROCONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO ENDURECIDO 86
3.6.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 86
3.6.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO 88
3.6.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA 89
3.7. DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS 92
3.7.1. ARMADURA DA VIGA 95
3.7.2. FÔRMAS 97
3.8. FABRICAÇÃO DO CONCRETO UTILIZADO NAS VIGAS 100
3.9. FABRICAÇÃO DO REPARO NAS VIGAS 102
3.10. ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS 103
3.11. ANÁLISE ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS 104
4. RESULTADOS 105
4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO 105
4.1.1. GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO 105
4.1.2. GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO 105
4.1.3. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA 106

4.1.4. ENSAIO DE BET _____107
4.1.5. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIO X (FRX) ___107
4.1.6. RESULTADO DO ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO X (DRX) ____108
4.2. METÓDO DE DOSAGEM - EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS E OKAMURA E OUCHI _____109
4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO _____111
4.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO _____119
4.4.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO _____120
4.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO _____121
4.4.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA _____124
4.4.4. CONCRETO CONVENCIONAL (VIGAS) _____125
4.4.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO DO REPARO_____126
4.4.6. VIGAS _____127
***5.* CONCLUSÕES_____135**
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS _____136
REFERÊNCIAS _____137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva granulométrica do concreto de referência, (Oliveira *et al.* 2018). ...33
Figura 2 – Curva granulométrica do concreto do concreto otimizado, (Oliveira *et al.* 2018). ...34
Figura 3 - Empacotamento de partículas, modelo de Alfred do C25 R, (Lopes; Peçanha; Castro, 2020)...36
Figura 4 - Empacotamento de partículas, modelo de Alfred - C40 R, (Lopes; Peçanha; Castro, 2020)...36
Figura 5 - Empacotamento de partículas, modelo de Alfred do C80 R, (Lopes; Peçanha; castro, 2020). ...37
Figura 6 - Curva de distribuição granulométrica secas...39
Figura 7 - Ensaio de Mini Slump. (Okamura; Ouchi, 2003) ...41
Figura 8 - Características de fabricação do concreto autoadensável, (Okamura, Ouchi, 2003). ...42
Figura 9 - Comparação entre o concreto convencional e o concreto autoadensável, (Okamura; Ouchi, 2003). ...42
Figura 10 - Método de dosagem simplificado do CAA (Gomes; Barros, 2009). ...46
Figura 11 - Composição mineralógica do agregado miúdo, (Jain; Guptar; Chaudhary; 2019) ...52
Figura 12 - Composição mineralógica do resíduo de rocha ornamental, (Jain; Guptar;2019) (Chaudhary, 2019)...52
Figura 13 - Resultado do ensaio de resistência à compressão, (Jain *et al*. 2020). ...61
Figura 14 - Resultado de resistência à abrasão, (Jain et al. 2020). ...61
Figura 15 - Resultado do ensaio de absorção, (Jain *et al*. 2020). ...62
Figura 16 - Organograma do programa experimental. ...69
Figura 17 - Poços que foi retirado o resíduo de granito...70
Figura 18 - Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria. ...74
Figura 19 - Ensaio de massa unitária. ...75
Figura 20 - Ensaio de granulometria a laser. ...77
Figura 21 - Equipamento usado no ensaio de de BET. ...78
Figura 22 - Ensaio de Espectrometria de Raio X sendo executado. ...78
Figura 23 – Ensaio de Difração de Raio X (DRX). ...79

Figura 24 – Curva de Andreasen modificada (Alfred).....80
Figura 25 - Cone utilizado para fazer o Mini slump. 81
Figura 26 - Ensaio do Mini slump executado.....81
Figura 27 - Ensaio Slump Flow Test. 82
Figura 28 - Ensaio do Funil V. 83
Figura 29 - Ensaio do Anel J. 85
Figura 30 - Ensaio da Caixa L. 86
Figura 31 - Máquina de Retifica. 87
Figura 32 - Prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão e tração. 88
Figura 33 - Disposição do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 (ABNT 2011).....89
Figura 34 - Corpos de prova dentro da estufa depois de setenta e duas horas. 91
Figura 35 - Corpos de prova dentro da panela antes do período de fervura. 91
Figura 36 - Viga com apoios, cargas concentradas e o reparo (França, et al., 2018), com modificações da autora.....92
Figura 37 - Viga com apoios, cargas concentradas e o reparo, (França, et al. 2018), com modificações da autora.....93
Figura 38 - Distribuição de tensões e deformações em viga de seção retangular com armadura simples.....94
Figura 39 - Aços com as medidas utilizados nas vigas. 96
Figura 40 – Estribo com as medidas utilizados nas vigas, (França, et al. 2018), com modificações da autora. 96
Figura 41 - Viga em 3D com as armaduras.....96
Figura 42 - Desenho da fôrma das vigas.....98
Figura 43 - Fôrma construída para a fabricação das vigas. 98
Figura 44 - Fôrma das vigas com entalhe de isopor.....99
Figura 45 - Fôrma das vigas com as ferragens. 99
Figura 46 - Fôrma de concreto preenchida com concreto. 100
Figura 47 - Vigas e corpos de prova desmoldados. 100
Figura 48 - Confecção do concreto. 101
Figura 49 - Vigas sem o entalhe de isopor. 102
Figura 50 - Máquina da prensa. 103
Figura 51 - Máquina da prensa executando o ensaio de flexão nas vigas. 103

Figura 52 - Curva granulométrica de distribuição do cimento, resíduo e areia.....105
Figura 53 - Curva granulométrica do agregado graúdo das vigas.....106
Figura 54 - Resultado do Ensaio de Difração de Raio X (DRX). 108
Figura 55 - Curva de Alfred com o empacotamento das composições. 109
Figura 56 - a) Composição de referência; b) composição com 20% de resíduo; c) Composição com 30% de resíduo; d) composição com 40% de resíduo..... 111
Figura 57 - Resultado do Slump flow e índice de estabilidade visual do MCARG30. 113
Figura 58 - Resultado do Slump flow e índice de Estabilidade visual do MCARG40. 113
Figura 59 - Ensaios com as composições de microconcreto autoadensáveis: a) slump flow e T500 e índice de estabilidade visual, b) funil V, c) anel J, d) caixa L. . 115
Figura 60 - Resultado do ensaio *slump flow.*.....116
Figura 61 - Resultado do ensaio Funil V.....117
Figura 62 - Resultado do ensaio do Anel J.....118
Figura 63 - Resultado do ensaio da Caixa L. 119
Figura 64 - Concreto utilizado na concretagem das vigas.....119
Figura 65 - Resultado do ensaio de Resistência à compressão.....120
Figura 66 - Corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão. 121
Figura 67 - Gráfico de resistência à tração.....122
Figura 68 - Corpos de prova após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....123
Figura 69 - Relação entre o momento de fissuração teórico e experimental para as composições dos microconcretos. 129
Figura 70 - Relação entre o momento último teórico e experimental para as composições dos microconcretos. 130
Figura 71 - a) Fissura no lado esquerdo da viga. b) Fissura do lado direito da viga. c) Fissura no meio da viga (flexão) e d) viga após a ruptura.....131
Figura 72 - a) Viga de referência, b) Viga com incorporação com 20% de resíduo, c) Viga com 30% de resíduo e Viga com 40% de resíduo.....132
Figura 73 - Fissura de cisalhamento à esquerda. 133
Figura 74 - Fissura de cisalhamento à direita.....133

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Diâmetro mínimo, máximo, densidade e módulo de finura dos materiais, (Bahiense *et* 31
Tabela 2 - Volume dos materiais de acordo com o modelo de empacotamento de Alfred, (Bahiense *et al.* 2020). 32
Tabela 3 - Volume dos materiais em m³ do concreto de referência, (Oliveira *et al.* 2018). 33
Tabela 4 - Faixas de valores típicos para o CAA adotados pela (EFNARC,2005).....45
Tabela 5 - Ensaios e suas propriedades, (Tutikian; Molin,2008) 47
Tabela 6 - Composição química do pó de granito, (Singh; Aggarwal, 2022). 49
Tabela 7 - Formação sequencial das misturas, (Singh; Aggarwal, 2022). 49
Tabela 8 - Tamanho e quantidade de amostra de cada mistura, (Singh; Aggarwal, 2022). 50
Tabela 9 - Resultado do ensaio de abatimento, (Singh; Aggarwal, 2022). 50
Tabela 10 - Resultado do ensaio de resistência à compressão, (Singh; aggarwal, 2022). 51
Tabela 11 - Resultado do ensaio de resistência à flexão, (Singh; Aggarwal, 2022) ..51
Tabela 12 - Composição elementar do agregado miúdo e resíduo de granito, (Jain; Guptar; Chaudhary, 2019) 52
Tabela 13 - Detalhes das proporções das misturas em Kg/m³ (Jain; Guptar; Chaudhary, 2019). 53
Tabela 14 - Resultados dos testes de características no estado fresco do CAA com o desvio padrão (Jain; Guptar; Chaudhary, 2019). 53
Tabela 15 - Resultados do concreto autoadensável no estado endurecido (Jain; Guptar; Chaudhary, 2019). 54
Tabela 16 - Caracterização das propriedades físicas (Gautam, *et al.* 2022). 56
Tabela 17 - Composição química dos materiais (Gautam, *et al.* 2022), modificada pela autora. 56
Tabela 18 - Proporção dos ingredientes da mistura (Kg/m³), (Gautam et al. 2022), com modificações da autora.....57
Tabela 19 - Resultados dos concretos autoadensáveis com as substituições, (Gautam *et al.* 2022).....58

Tabela 20 - Propriedades físicas dos materiais (Jain *et al*. 2020). 59
Tabela 21 – Composição química do material......60
Tabela 22 - Composições do concreto. 60
Tabela 23 - Proporções de misturas (Kg/m³) de mistura de concreto contendo resíduo de granito (Khan *et al*. 2016). 63
Tabela 24 - composição química do cimento, areia e resíduo de granito, (Jain; Sancheti; Gupta, 2020).....64
Tabela 25 - Detalhes das misturas preparadas (Jain; Sancheti; Gupta, 2020).....64
Tabela 26 - Composição química dos materiais (Sing *et al.* 2016).....65
Tabela 27 - Apresenta as proporções dos materiais das misturas (SING *et al.* 2016). 66
Tabela 28 - Especificações do Superplastificante utilizado na pesquisa. 71
Tabela 29 - Especificações do Modificador de viscosidade utilizado na pesquisa. ...72
Tabela 30 - Tipos e comprimento dos aços utilizados na viga.....97
Tabela 31 - Detalhes da armadura utilizada embaixo da viga. 97
Tabela 32 - Traço do concreto convencional para a viga.....101
Tabela 33 - Massa específica real e massa unitária do agregado miúdo e do resíduo de rocha ornamental.....106
Tabela 34 - Resultado do ensaio de BET.....107
Tabela 35 - Composição química do resíduo de granito.....108
Tabela 36 - Composições dos mircroconcretos após o estudo de empacotamento de partículas.....110
Tabela 37 - Composições dos mircroconcretos após o estudo de empacotamento de partículas.....111
Tabela 38 - Resultados e classificação dos microconcretos de acordo com a norma ABNT NBR 15823-1 (2017).....112
Tabela 39 - Resultado do ensaio de resistência à compressão com 28 dias. 123
Tabela 40 - Resultados do ensaio de resistência à tração com 28 dias. 124
Tabela 41 - Resultados de massa específica, absorção de água e índice de vazios em corpos de prova de CAA, aos 90 dias de idade, conforme a (ABNT NBR 9778 (2005).....124
Tabela 42 - Resistência à compressão do concreto convencional das vigas e seus parâmetros estatísticos. 125

Tabela 43 - Resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional das vigas e seus parâmetros estatísticos. 126
Tabela 44 - Resistência à compressão do reparo. 126
Tabela 45 - Resistência à tração do reparo. 127
Tabela 46 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração das argamassas. 134

LISTA DE ABREVEATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LECIV	Laboratório de Engenharia Civil
LAMAV	Laboratório de Materiais Avançados
UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro
NBR	Norma Brasileira Registrada
NBR NM	Norma Brasileira Registrada Mercosul
EFNARC	European *Federation of National Trade Associations*
CAA	Concreto Autoadensável
CV	Concreto convencional
MCAA	Microconcreto Auto-adensável
CP-V ARI	Cimento Portland de Alta resistência inicial
BET	Superfície Específica (Brunauer, Emmet e Teller)
MCARG0	Composição de referência
MCARG20	Composição com incorporação de 20% de resíduo
MCARG30	Composição com incorporação de 30% de resíduo
MCARG40	Composição com incorporação de 40% de resíduo
SP	Superplastificante
MV	Modificador de viscosidade

LISTA DE SÍMBOLOS

D_s	Diâmetro menor das partículas de distribuição;
D_p	Diâmetro da partícula;
D_l	Tamanho da maior partícula de distribuição;
r	Razão entre os volumes de partículas em classes de tamanhos adjacentes
q	Constante;
D_c	Massa específica do cimento;
D_a	Massa específica do agregado miúdo;
D_r	Massa específica do resíduo;
D_b	Massa específica do agregado graúdo;
Gm	Diâmetro de espalhamento;
D_m	Média dos diâmetros do microconcreto;
D_0	Diâmetro do mini cone;
$T_{25seg.}$	Tempo de escoamento da massa de concreto;
HP	Habilidade passante;
H_1	Câmara horizontal;
H_2	Câmera vertical;
f_c	Resistência à compressão;
F	Força máxima alcançada;
D	Diâmetro do corpo de prova;
f_{ct}	Resistência à tração;
l	Comprimento do corpo de prova;
m_{sat}	Massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;
m_s	Massa da amostra seca na estufa;
I_v	Índice de vazios;
M_i	Massa saturada imersa após a fervura;
ΣN	Somatório de força normal;
R_{cc}	Resultante das tensões de deformação
R_{st}	Resultante das tensões da armadura;
b_w	Largura da seção da viga;
X	Posição da Linha Neutra;

f_{cd} Cálculo da resistência à compressão do concreto;

σ_{sd} Tensão de cálculo na armadura tracionada;

A_s Área do aço da armadura tracionada;

d Altura efetiva da viga;

h Altura efetiva da viga;

d’ Cobrimento estrutural da viga;

S Espaçamento entre os estribos;

ρ Taxa geométrica de armadura longitudinal de tração;

A_{sw} Área da seção transversal da armadura transversal;

ρ_{sw} Taxa geométrica de armadura transversal;

α 1,5 para seções retangulares;

y_t distância do centro de gravidade da seção mais tracionada; (h/2)

I_c momento de inércia da seção transversal bruta de concreto;

ε_{cd} Deformação de alongamento do encurtamento do concreto comprimido;

ε_{sd} Deformação de alongamento da armadura tracionada.

RESUMO

O concreto autoadensável é crucial na construção civil devido à sua capacidade de aumentar a produtividade, melhorar o ambiente construtivo e contribuir para a sustentabilidade. Uma característica distintiva deste material reside em suas propriedades no estado fresco, como fluidez, viscosidade e resistência à segregação, as quais desempenham um papel importante em seu desempenho. Para alcançar tais características, adições minerais e materiais finos são incorporados em sua composição, muitos dos quais podem ser obtidos a partir de resíduos industriais. Dentre os resíduos industriais passíveis de utilização, destaca-se aquele proveniente do corte e beneficiamento de rochas ornamentais, como o granito. A destinação inadequada desses resíduos pode acarretarem problemas ambientais e a saúde pública. O estudo tem como objetivo produzir microconcretos autoadensáveis com incorporação de resíduos de rochas ornamentais para aplicação de reparos estruturais. Nesta pesquisa foram produzidos quatro composições de microconcretos autoadensáveis, com substituição parcial de 20%, 30% e 40% da areia natural pelo resíduo de granito, além de um traço de referência sem incorporação de resíduos. Para diminuir a porosidade dos microconcretos, foi realizado um estudo de empacotamento de partículas utilizando o método de Alfred. Os parâmetros reológicos foram testados pelos ensaios Slump Flow, Índice de análise Visual (IEV), T500, Funil V, Caixa L e Anel J. As propriedades mecânicas foram avaliadas através dos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral e como indicadores de durabilidade foram utilizados os testes de absorção por imersão. Neste trabalho o microconcreto autoadensável produzido foi utilizado para fazer reparo em vigas, que foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos. Os microconcretos produzidos atenderam as propriedades reológicas para serem classificados como autoadensáveis, sendo a composição com 20% de resíduo foi a composição que teve o melhor empacotamento e consequentemente a maior resistência e durabilidade. No entanto, a mistura de controle demonstrou um desempenho superior no ensaio de flexão quando empregada como agente de reparo da viga.

Palavras-chave: concreto autoadensável, reologia, resíduo de rocha ornamental.

ABSTRACT

Self-compacting concrete is crucial in construction due to its ability to increase productivity, improve the construction environment and contribute to sustainability. A distinctive feature of this material lies in its fresh properties, such as fluidity, viscosity and resistance to segregation, which play an important role in its performance. To achieve such characteristics, mineral additions and fine materials are incorporated into its composition, many of which can be obtained from industrial waste. Among the industrial waste that can be used, the one that comes from the cutting and processing of ornamentais rocks, such as granite, stands out. Inadequate disposal of this waste can lead to environmental and public health problems. The study aims to produce self-compacting microconcretes incorporating ornamental stone waste for structural repairs. In this research, four compositions of self-compacting microconcrete were produced, with partial replacement of 20%, 30% and 40% of natural sand with granite waste, in addition to a reference mix without incorporation of waste. To reduce the porosity of microconcretes, a particle packing study was carried out using the Alfred method. The rheological parameters were tested by the Slump Flow, Visual Analysis Index (IEV), T500, Funnel V, Box L and Ring J tests. The mechanical properties were evaluated through the compressive strength, diametral compression tensile tests and as indicators of durability, immersion absorption tests were used. In this work, the self-compacting microconcrete produced was used to repair beams, which were subjected to the four-point bending test. The microconcretes produced met the rheological properties to be classified as self-compacting, and the composition with 20% residue was the composition that had the best packaging and consequently the greatest resistance and durability. However, the control mixture demonstrated superior performance in the bending test when used as a beam repair agent.

Keywords: self-compacting concrete, rheology, ornamental rock resíduo.

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma das grandes questões enfrentadas em escala global diz respeito à gestão do descarte de resíduos, independentemente das razões subjacentes serem de ordem econômica, ecológica ou política. O estímulo à prática da reciclagem de resíduos provenientes de todos os setores da cadeia produtiva tem crescido, representando uma alternativa viável para reduzir a exploração de matérias-primas.(Mashaly; Shalaby; Rasshwan, 2018); (Silva; Junior; Holanda, 2011); (Azevedo *et al.* 2019). Os subprodutos industriais ou resíduos têm aumentado ao longo do tempo, apresentando um desafio global em relação à sua disposição adequada. O crescente volume de resíduos está levando pesquisadores a explorar formas sustentáveis de utilizá-los.(Siddique *et al.* 2018). Um dos setores que consomem mais recursos globalmente é o da construção civil. Por essa razão, nos últimos anos, têm-se conduzido estudos sobre a reutilização de resíduos industriais na fabricação de materiais de construção. (Azevedo *et al.* 2019).

A areia natural é um material amplamente empregado na indústria da construção em todo o mundo. O consumo anual de areia é estimado em cerca de 5 bilhões de toneladas, o que contribui para a crescente escassez desse recurso natural. (Cheah; Ramli, 2019). Portanto, torna-se relevante investigar materiais alternativos para a produção de concreto, como a substituição parcial da areia por resíduos de rochas ornamentais. O Brasil detém uma posição de destaque global no setor de rochas, com uma produção de 8 e 9 milhões de toneladas em 2018 e 2019, respectivamente, situando-se entre os cinco principais produtores mundiais, com uma participação global de 5,4%. A produção de rochas ornamentais no país está concentrada em regiões tradicionais como Minas Gerais e Espírito Santo, mas também tem crescido em estados como Bahia e Ceará. (Montani, 2019).

Essa grande produção gera muitos resíduos sólidos que apresentam uma problemática ambiental se não forem descartados de forma correta. A geração ocorre em elevada quantidade em forma de lama e ao secar transforma-se em um pó fino. . O descarte desse resíduo de forma incorreta pode causar danos

ambientais como por exemplo a contaminação de rios, córregos, solo e o ar e pode causar problemas a saúde humana por inalação (Aydin; Kaya; Karakurt, 2017); (Silva; Junior; Holanda, 2011); (Medina *et al.,* 2017). É evidente que todos esses impactos podem ser minimizados através da reciclagem desse resíduo que pode ser utilizado na fabricação de argamassa, concreto, microconcreto entre outros. A fim de minimizar a utilização da areia que é um recurso natural e diminuir os impactos ambientais com os resíduos de rochas ornamentais, foi feito o estudo com microconcreto autoadensável com a substituição parcial da areia em 20%, 30% e 40% pelo resíduo de rocha ornamental. Para reduzir a porosidade do microconcreto, empregou-se o método de empacotamento de Andreasen Modificado (Alfred). Neste estudo, foram preparados quatro tipos de microconcretos: um de referência e os demais com substituições parciais da areia em 20%, 30% e 40%. Para a análise reológica, foram realizados ensaios de Slump Flow, análise visual, T500, Funil V e Anel J. Quanto à análise das resistências mecânicas e durabilidade, conduziram-se ensaios de resistência à compressão, à tração e de absorção de água. Os microconcretos autoadensáveis produzidos foram empregados no reparo de vigas com dimensões de 100 mm x 100 mm x 650 mm, as quais foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos.

1.2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de microconcretos autoadensáveis com incorporação de resíduos de rochas ornamentais para aplicação de reparos estruturais

1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Desenvolver formulações de microconcretos autoadensáveis incorporando diferentes proporções de resíduos de rochas ornamentais;
b) avaliar as propriedades físicas dos microconcretos, como trabalhabilidade, resistência ao escoamento e segregação;
c) investigar as propriedades mecânicas dos microconcretos, incluindo resistência à compressão, tração e flexão;

d) comparar as propriedades dos microconcretos com e sem incorporação de resíduos de rochas ornamentais, para avaliar os efeitos dessa adição na performance dos materiais.

1.3. JUSTIFICATIVAS

Em 2016, o Brasil se posicionou como o quarto maior produtor global de rochas ornamentais, com uma extração total de 8,5 milhões de toneladas. Cerca de 80% desse volume provém dos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará e Bahia, sendo o Espírito Santo o principal centro de processamento desses materiais no país (Montani, 2017). A configuração da indústria brasileira está predominantemente direcionada ao processamento de materiais abundantemente disponíveis internamente, tais como granitos, ardósias e outras rochas siliciosas (Montani, 2017). A utilização de resíduos de rochas ornamentais na fabricação de materiais de construção é um tema amplamente estudado do ponto de vista técnico, com suas influências nas propriedades mecânicas e na durabilidade do material resultante sendo bem conhecidas. Uma variedade de estudos tem demonstrado a viabilidade técnica da incorporação do resíduo de rocha ornamental como substituto ou adição a outras matérias-primas na produção de diversos materiais empregados na construção civil, tais como concreto, argamassa e blocos d(Gesoglu e concreto (Rana *et al.* 2016), (Baeza *et et al.* 2014), *al.* 2012).

A utilização de resíduos na construção civil é uma alternativa promissora, dada a grande demanda por recursos naturais nesse setor e sua capacidade de absorver resíduos sólidos. Por exemplo, os resíduos de rocha ornamental podem ser empregados como enchimento em concreto devido à sua composição granulométrica, que inclui altos teores de finos e superfinos. A substituição parcial do cimento por esses resíduos pode contribuir significativamente para melhorar tanto o desempenho técnico quanto o ambiental do concreto. Além de reduzir o consumo de cimento, essa prática diminui as emissões de CO_2 associadas à produção de cimento e o calor gerado durante sua hidratação, especialmente em grandes quantidades. O resíduo de rocha ornamental, além da sua incorporação do cimento ela também pode ser empregada com o propósito de minimizar o consumo de areia na construção civil, resultando em uma diminuição significativa do uso dessa

matéria-prima. Com isso além de diminuir a emissão de CO_2 para atmosfera, diminui o uso de matéria prima e o custo na construção (Çankaya; Pekey, 2019), (Celik *at al.* 2015), (Souza *et al*. 2021).

1.4. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em 5 capítulos. O primeiro capítulo contém a introdução, relevância do tema, assim como o objetivo geral, os objetivos específicos e a descrição da estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, é apresentada a revisão bibliográfica, que discute conceitos relacionados ao microconcreto, concreto autoadensável, suas propriedades, bem como abordagens sobre o método de dosagem e empacotamento utilizado neste estudo. Foram analisadas referências relevantes para a pesquisa, incluindo estudos que exploram a incorporação de resíduos de

Rochaornamental em concretos.

O terceiro capítulo aborda a metodologia empregada neste estudo. Ele descreve os materiais utilizados, o procedimento adotado para o estudo de empacotamento e dosagem, bem como os ensaios conduzidos no estado fresco e os ensaios relacionados às propriedades mecânicas e de durabilidade.

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados e suas respectivas análises.

No quinto capítulo estão as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre os principais conceitos abordados nessa dissertação.

2.1. MICROCONCRETO

O microconcreto é definido como uma variação do concreto convencional, caracterizada pela presença de cimento Portland, agregado miúdo e uma proporção de agregados graúdos com dimensões inferiores às encontradas nos concretos convencionais, sendo denominados de microagregados. (Bacarji, *et al.* 2019),(Flekoglu, 2007). A relação água/cimento é reduzida, e devido a presença de materiais finos, a porosidade do microconcreto é significativamente inferior quando comparado ao concreto convencional. Esse fator contribui para uma menor permeabilidade e consequentemente uma maior durabilidade do material. (Flekoglu,2007) O microconcreto é definido como um concreto de alto desempenho que proporciona micro agregados, de tamanhos de partículas que variam de 0,5 mm a menos de 1 μm (Silva; Virgens, 2018). A característica principal que diferencia o concreto convencional do microconcreto é a dimensão máxima do agregado graúdo (Flekoglu, 2007). A inclusão de micro agregados melhora a densidade de empacotamento de elementos cimentícios, melhorando as características mecânicas e reológicas do material (Flekoglu 2007).

De acordo com (Campos 2002) a indústria de construção civil institui-se por procedimentos tecnológicos e desenvolvimento de produtos. Com o tempo a tecnologia do concreto foi evoluindo e com isso pode-se alcançar concretos mais duráveis e resistentes.

2.2. CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O concreto autoadensável (CAA) é um concreto que não requer vibração para lançamento e compactação. É capaz de fluir com o seu próprio peso, preenchendo totalmente as cofragens e atingindo a compactação total, mesmo na presença de armaduras. O CAA no estado endurecido é denso, homogêneo e possui as mesmas

propriedades de engenharia e durabilidade do concreto vibrado tradicional. O CAA foi desenvolvido até o final da década de 1980 no Japão. Na Europa, provavelmente foi utilizado pela primeira vez em obras para redes de transporte na Suécia em meados dos anos de 1990. O CAA oferece agilidade na construção e tem um fluxo melhor em construções com muitas ferragens. A fluidez e a resistência à segregação do CAA garantem um alto nível de homogeneidade, mínimos de vazios no concreto, alta resistência, um bom nível de acabamento e durabilidade da estrutura. O CAA frequentemente é produzido com baixa relação água/cimento, proporcionando o potencial de alta resistência inicial e desmoldagem precoce. A eliminação de equipamentos vibratórios melhora o ambiente construtivo e diminui a poluição sonora nas proximidades da obra. A prática e o desempenho aprimorado da construção, combinados com os benefícios de saúde e segurança tornam o CAA uma solução boa para construção civil. Em 2002, a EFNARC (*European Federation of National Trade Associations*) publicou a Especificações e Diretrizes para concreto autoadensável que, naquela época fornecia informações de última geração para produtores e usuários. Desde então, muitas informações técnicas adicionais sobre CAA foram publicadas (Murthy *et al.* 2012).

O concreto é considerado autoadensável se forem alcançadas três propriedades simultaneamente: fluidez, coesão (habilidade passante), e resistência à segregação (EFNARC, 2005). A fluidez é a propriedade que o CAA tende a fluir dentro da fôrma, preenchendo todos os espaços vazios. Coesão é a capacidade do material passar na fôrma e nas armaduras de aço sem nenhuma obstrução do fluxo ou segregação. A resistência à segregação se define pela habilidade que o CAA tem de manter-se coeso quando fluir dentro da fôrma, passando por obstáculos ou não (Tutikian; Molin*,* 2008). O uso do CAA acelera o processo construtivo, pois tem o lançamento rápido e não precisa de adensamento, reduz a mão de obra, melhora o acabamento final da superfície, pode aumentar a durabilidade, tem uma vasta liberdade em relação de dimensão e fôrmas diferentes, permite a concretagem em peças pequenas, reduz o barulho de vibração no canteiro de obra, o trabalho se torna mais seguro pois pode reduzir o número de trabalhadores, ele permite ganhos ecológicos, pois na sua composição pode ter teores de resíduos industriais como por exemplo a escória de alto forno, cinza de casca de arroz ou cinza volante, pode ter redução do custo final (Tutikian; Molin, 2008), (Alyousef *et al.* 2018).

Os constituintes do CAA são os mesmos do concreto convencional. Entretanto para se obter uma boa produção de CAA depende das proporções da mistura para ter um concreto de qualidade e fluído sendo assim evitando a exsudação e a segregação durante o transporte da concretagem. Deve-se conhecer os materiais constituintes e as suas proporções e efeitos para que a mistura atenda todas as propriedades de autoadensabilidade, que são avaliadas através dos ensaios do concreto no estado fresco (Gomes; Barros, 2009).

2.3. PROPRIEDADES DO CONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO FRESCO

As propriedades do concreto autoadensável no estado fresco estão relacionadas a reologia do concreto, (Gomes; Barros, 2009). A reologia é a ciência que lida com o fluxo de materiais, estão incluídos os estudos de deformação do concreto no estado endurecido, como por exemplo deformação de fluência, de misturas de concreto fresco, manuseio, lançamento e o comportamento de pastas e similares (ACI 116R 1990).

A viabilidade da construção de concreto depende da capacidade de quantificar as qualidades reológicas do concreto: a primeira é a trabalhabilidade do concreto fresco é uma das base da mistura de concreto para a finalidade de controle de qualidade; a segunda é o comportamento do escoamento no estado fresco que afeta as propriedades do concreto no estado endurecido; a terceira é a colocação do concreto, que inclui bombeamento, transporte, vazamento e vibração, é afetada pela viscosidade plástica e tensão de escoamento do concreto fresco (Mouhcine *et al.* 2022).

A Norma da ABNT NBR 15823-1: 2017 estabelece parâmetros e critérios para o CAA no estado fresco por meio de ensaios para a verificação das suas propriedades. Através dos ensaios são avaliados a fluidez que ocorre de acordo com os resultados de espalhamento; a viscosidade que é medido através do tempo de escoamento ou tempo de espalhamento e habilidade passante que é feito segundo os resultados do anel J e caixa L. Através dessa norma o concreto pode ser analisado visualmente após término do escoamento.

2.4. PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO ENDURECIDO

É fundamental que as propriedades mecânicas do Concreto Autoadensável (CAA) estejam em conformidade para garantir sua adequação às normas técnicas e aos requisitos de projeto. O comportamento mecânico do concreto é comumente avaliado por meio de suas características de resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, as quais desempenham um papel crucial na determinação da durabilidade e da vida útil do material. (Parra; Valcuende; Gómez, 2011)

A EFNARC (2005) apresenta algumas comparações entre o CAA e o CV (concreto convencional) no estado endurecido:

- A relação água e cimento entre o CV e o CAA são semelhantes;
- a resistência a tração do CV pode assumir os mesmos resultados do CAA;
- o CV tem o valor de pasta menor do que o CAA, consequentemente o módulo de elasticidade é menor;
- o CAA apresenta maior uniformidade, baixa permeabilidade, consequentemente mais durabilidade;
- o CAA geralmente tem uma resistência à compressão maior em relação ao CV, pois a quantidade de materiais finos diminui a porosidade;
- a resistência à tração do CAA é igual ao CV porque o volume da pasta (cimento + finos + água) não tem efeito significativo para a resistência à tração.

O CAA, tem um alto calor de hidratação devido na sua dosagem ter um alto consumo de cimento que geralmente é utilizado de alta resistência inicial, podendo assim causar patologias como por exemplo: fissuras e expansões na estrutura. O tempo de pega pode ser retardado através do uso de superplastificante (Tutikian; Molin, 2008).

2.5. DURABILIDADE DO CAA

Segundo a NBR 6118 (ABNT 2023) a durabilidade é definida como a capacidade da estrutura de resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Segundo a EFNARC, 2005 a durabilidade de uma estrutura está relacionada com a permeabilidade da camada, está deve limitar a entrada de substâncias que podem iniciar ou propagar ações deletérias como por exemplo: $CO_{2,}$ cloreto, sulfato, água, oxigênio, álcalis, ácidos etc. Na prática, a durabilidade depende da seleção dos materiais, composição do concreto bem como grau de supervisão durante o procedimento de concretagem, compactação, acabamento cura do concreto. (EFNARC, 2005).

Segundo Ribeiro, (2014), o concreto é considerado durável quando desempenha as funções a que lhe foram destinadas, mantendo a resistência durante um período de tempo, mas esse fator depende de alguns parâmetros, como: agressividade ambiental, características da construção, critérios de desempenho desejados e do tempo, ou seja, a vida útil requerida. A durabilidade depende também da espessura do cobrimento da armadura e das características do concreto (Almeida *et al.* 2014).

2.6. MÉTODOS DE DOSAGEM

O método de dosagem da mistura é uma parte muito importante para a produção e aplicação do concreto. Consiste na seleção de matérias-primas em proporções ótimas para alcançar as propriedades necessárias em estados frescos e endurecidos para aplicações específicas. O CAA é uma mistura sensível, fortemente dependente da composição e das características dos seus constituintes (Kahan, 2017).

Nos últimos anos aumentou o estudo sobre empacotamento de partículas em diferentes áreas da engenharia. Este interesse começou pelo fato de que grande parte dos materiais naturais ou industriais utilizados diariamente possui partículas de tamanhos e formas diferentes (Castro; Ferreira, 2016). Em 1982 foi publicado por Féret o primeiro tratado sobre empacotamento de partículas em concreto, onde

apresentou a possibilidade da seleção de tipos adequados de agregados e a relação entre a porosidade do material quando está no estado endurecido e a resistência a compressão quando submetido ao processo de cura úmida (Castro; Pandolfelli, 2009).

Empacotamento de partículas tem a definição como a adequação e seleção da proporção e do tamanho das partículas, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos pelos vazios menores, cujo vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, os vazios serão preenchidos com partículas ainda menores, e assim sucessivamente. O empacotamento de partículas é importante na obtenção de concretos, principalmente para melhorar as propriedades no estado fresco e endurecido. Entretanto, o empacotamento de baixa densidade é utilizado a produção de revestimentos, isolantes térmicos, nos quais apresentam índice alto de vazios e, consequentemente uma porosidade associada (Oliveira *et al.* 2000).

A distribuição de tamanho das partículas do agregado no concreto tem grandes influência no efeito sobre o desempenho dele na dosagem produzida. A fim de preencher os espaços entre as partículas do agregado, para reduzir os vazios do concreto, o volume da pasta de cimento tem que ser maior do que o volume de lacunas dentro do esqueleto total. Uma mistura com um tamanho de partícula somente (distribuição uniforme) geralmente possui um maior consumo de pasta. Assim, a distribuição de tamanho de partículas influencia na densidade de empacotamento do agregado que, por sua vez, irá determinar o volume de vazios a serem preenchidos pela pasta (Kwan*;* NG; Huen, 2014).

Desde o início do século XX, alguns pesquisadores começaram a estudar o efeito da distribuição granulométrica dos agregados sobre o empacotamento de partículas, buscando curvas granulométricas ideais por meio dos modelos de empacotamento para uso em concretos. Os pioneiros neste desafio foram Fuller e Thompson, no ano de 1970, que propuseram uma curva granulométrica de distribuição continua (Londero *et al.* 2017).

2.6.1. MODELO DE FURNAS

Furnas iniciou as suas pesquisas com o empacotamento de partículas com distribuição discreta, posteriormente estendeu-se o estudo para distribuições

contínuas dos tamanhos de partículas. No ano de 1930, desenvolveu trabalhos voltados para o empacotamento de partículas com distribuição discreta. A hipótese inicial de Furnas era que a máxima densidade de empacotamento possível ocorreria quando apenas dois tamanhos de partículas estivessem presentes na mistura. Posteriormente ele aperfeiçoou a sua teoria ao mostrar que os empacotamentos densos eram obtidos com três ou mais tamanhos de partículas discretas e que a densidade obtida era uma função dos tamanhos e quantidades de partículas presentes na mistura. Dessa forma, estendeu esta solução de multicomponentes de tamanho discreto para distribuições contínuas (Funk; Dinger, 1994). Furnas verificou que a densidade máxima de empacotamento com diferentes tamanhos e proporções de partículas era obtida por uma progressão geométrica (Oliveira *et al.* 2000). Como mostra a Equação 1:

$$\text{CPFT} = \left(\frac{Dp^{logr} - Ds^{logr}}{Dl^{logr} - Ds^{logr}}\right)100\% \qquad (1)$$

onde,

CPFT = Porcentagem acumulada de partículas diâmetro inferior;

D_S = diâmetro menor de partículas de distribuição;

D_l = Tamanho da maior partícula de distribuição;

r = Razão entre os volumes de partículas em classes de tamanhos adjacentes.

2.6.2. MODELO DE ANDREASEN

O modelo de Andreasen defendeu que o empacotamento de partículas deveria basear-se em distribuição de partículas contínuas (Oliveira *et al.* 2000). De acordo com (Oliveira *et al.,* 2001) o empacotamento de Andreasen é aquele que as partículas com dimensões diferentes, tem alguma similaridade. A similaridade foi traduzida por uma lei de potência, então foi proposta pelo modelo de Andreasen como apresenta a Equação 2, (Oliveira *et al.* 2000).

$$\text{CPFT} = \left(\frac{D_p}{D_l}\right)^q 100\% \qquad (2)$$

onde,

CPFT = Porcentagem acumulada de partículas menores que o tamanho Dp;

Dp = diâmetro da partícula;

DI = Diâmetro da maior partícula de distribuição;

q = Este valor está compreendido entre 0,33 até 0,50.

A representação gráfica da equação de Andreasen em escala logarítmica é uma reta de inclinação q. Porém foi verificado que a inconsistência nessa equação: não há um limite mínimo para o tamanho de partículas, de modo que se admite partículas infinitamente pequenas, o que não condiz com a situação real. Entretanto, a representação gráfica em escala logarítmica se aproxima, mas nunca atinge, tamanho de partículas nulo ou CPFT igual a zero. Além disso Andreasen sugeriu que um termo de correção fosse utilizado para ajustar o percentual de porosidade para ausência dessas partículas pequenas (Oliveira *et al.* 2000). A pesquisa de Andreasen foi criticada, sendo considerada desprovida de teoria porque necessitava de maior fundamentação matemática. A equação proposta por Andreasen não é empírica, mas é baseada na condição de similaridade (Funk; Dinger, 1994).

2.6.3. MODELO DE ALFRED

Após as análises comparativas entre os modelos de Furnas e Andreasen, foram feitas algumas considerações, ficou comprovado que os dois modelos convergiam matematicamente para uma única equação. No modelo de Furnas, a quantidade de partículas finas de diâmetros distintos adicionada para construir a distribuição forma uma progressão geométrica, enquanto a distribuição por Andreasen gera uma reta linear quando representada graficamente em escala logarítmica, também indicando uma progressão geométrica. O modelo de Alfred, é um aperfeiçoamento dos modelos anteriores e mostra que, na realidade, os modelos de Furnas e de Andreasen podem ser visualizados como duas formas distintas de se expressar a mesma coisa (Funk; Dinger, 1994). A Equação 3 apresenta o cálculo pelo método de empacotamento de Alfred.

$$\text{CPFT} = \left(\frac{Dp^q - Ds^q}{Dl^q - Ds^q}\right)100\% \qquad (3)$$

onde,

CPFT = Porcentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior Dp;

Dp = diâmetro da partícula;

Dl = Diâmetro da maior partícula de distribuição;

Ds = Diâmetro de menor partícula na distribuição;

q = Constante do módulo de distribuição granulométrica.

Através de simulações computacionais, foi verificado que o módulo de distribuição granulométrica (q), ao assumir valores menores ou iguais a 0,37, pode favorecer empacotamento máximo para distribuições infinitas, enquanto para valores acima de 0,37 é verificada sempre uma porosidade residual. A redução do valor do coeficiente de distribuição se dá no aumento da quantidade de finos, que influencia a interação entre partículas (Castro*;* Pandolfelli, 2009). Os três modelos de empacotamento apresentados anteriormente possuem diferenças significativas.

Os estudos apontam que o modelo de empacotamento de Alfred é o mais eficiente e o modelo de Furnas é o menos eficiente (Oliveira *et al.* 2000).

Bahiense *et al.* 2021

O artigo propôs um procedimento de dosagem para pavimentos de concreto intertravados, que na sua composição foi incorporado resíduos de rochas ornamentais, visando garantir a sustentabilidade da indústria mineral e atender aos critérios de moldagem e mecânicos. O estudo aborda a determinação empírica de misturas granulares para concreto frequentemente utilizando curvas de distribuição ideal (PSD). Essas curvas ajudam encontrar proporções ideais de granulometria para se aproximar da densidade máxima de empacotamento da mistura. No entanto, os métodos empíricos não conseguem prever com precisão a densidade de empacotamento, muitas vezes exigindo vários experimentos para otimizar a mistura granular. No artigo foi utilizado o modelo matemático de empacotamento de partículas, destacando o modelo de Andreassen Modificado (Alfred) por apresentar agregados heterogêneos devido à sua capacidade de lidar com diferentes tamanhos de partículas.

A ferramenta utilizada para fazer o cálculo foi o programa EMMA versão 3.5.2 da empresa Elkem Material Mix Analyzer, ele é muito utilizado nas indústrias de

concreto cerâmica e misturas em pó. O programa utiliza dados de entrada, como características granulométricas e massa específica dos materiais. No estudo foi utilizado o coeficiente de distribuição (q) de 0,20 a 0,29 para descobrir qual a melhor constante a ser utilizada no estudo.

No presente estudo os materiais apresentam a granulometria substancial no tamanho das partículas, favorecendo a granulometria contínua resultante das misturas dos agregados. A Tabela 1 apresenta o diâmetro mínimo, máximo, densidade e modulo de finura dos materiais.

Tabela 1 - Diâmetro mínimo, máximo, densidade e módulo de finura dos materiais, (Bahiense *et al.* 2021).

Material	Diâ. mín. (mm)	Diâ. máx. (mm)	Mód. De finura	Densidade
Agre. miúdo	0,15	4,8	2,25	1,41 103
Agre. graúdo	1,2	9,5	5,08	1,59 103
Resíduo	0,00136	0,84	0,3	1,47 103

Para determinar os volumes dos materiais a serem utilizados foi feito o empacotamento, o modelo utilizado foi o de Alfred para determinar a quantidade de cimento ideal para a mistura, após o resultado, o volume dos materiais foi adicionado ao programa. A Equação 4 apresenta o cálculo de empacotamento para descobrir a quantidade ideal de cimento.

$$C=\frac{1000}{\frac{C}{Dc}+\frac{a}{Da}+\frac{r}{Dr}+\frac{b}{Db}+a/c} \qquad C=\frac{1000}{\frac{1}{3,12}+\frac{0,76}{2,57}+\frac{1}{1}+\frac{2,24}{2,66}+0,5} \tag{4}$$

onde,

Dc = Massa específica do cimento;

Da = Massa específica do agregado miúdo;

Dr = Massa específica do resíduo;

Db = Massa específica do agregado graúdo.

A Tabela 2 apresenta o volume dos materiais utilizados na mistura em m³.

Tabela 2 - Volume dos materiais de acordo com o modelo de empacotamento de Alfred, (Bahiense *et al.* 2020).

Mistura	**Cimento**	**Agregado miúdo**	**Desperdício**	**Agregado graúdo**	**Água**
Volume dos materiais (Kg/m^3)	438,60	333,33	438,60	982,46	219,30

Concluiu-se que através do empacotamento foi definido que os melhores coeficientes de distribuição foram os de 0,20 e 0,25, a mistura que continha 20% de cimento, 15,2% de agregado miúdo, 44, 8% de agregado graúdo, 20% de resíduo de rocha ornamental e o teor de superplastificante 6% obtiveram os melhores resultados. A resistência à compressão foi de 36,70 MPa, atendeu aos critérios mecânicos.

Oliveira *et al.* 2018

O concreto de alto desempenho (CAD) é um tipo de concreto utilizado em estruturas, conhecido por sua resistência à compressão e durabilidade. Essas características permitem a redução do uso de materiais e a extensão da vida útil das estruturas, resultando em economia de custos de manutenção. O uso de CAD tem crescido globalmente, a sua produção requer a aplicação de conceitos de engenharia de microestrutura, incluindo a seleção cuidadosa e dosagem de componentes, além do uso de reologia e empacotamento de partículas como métodos importantes.

O empacotamento de partículas tem o conceito que envolve a seleção adequada de proporções e tamanhos de partículas para preencher eficazmente os vazios, promovendo muita densidade de empacotamento. Isso é importante para suspensões concentradas, como concreto, onde a distribuição do tamanho de partículas influencia as propriedades reológicas e o desempenho do concreto fresco. Modelos matemáticos, como o modelo de Alfred, são usados para calcular a densidade teórica de empacotamento e otimizar as misturas granulares.

Neste artigo foram feitos dois tipos de CAD o primeiro foi o de referência e o segundo foi otimizado a base do conceito de empacotamento de partículas.

Nois dois concretos foram utilizados o cimento Portland CP II E 32, com massa específica de 3,05 g/cm³. Para a produção do CAD de referência foi utilizado a brita 1, com massa específica de 2,87 g/cm³ e areia natural média, com massa específica de 2,62 g/cm³. Na composição do CAD otimizado, baseado no modelo de empacotamento de partículas, foram utilizados todos os materiais acima citados e mais os seguintes agregados: pedrisco (massa específica de 2,81 g/ cm³), pó de pedra (massa específica de 2,87 g/ cm³) e areia industrial fina (massa específica 2,64 g/cm³). Foi feita a adição de sílica ativa (massa específica 2,40 g/cm³). Foi utilizado o aditivo químico da terceira geração à base de éter policarboxílico e a água utilizada foi proveniente do abastecimento da rede local. A Tabela 3 apresenta o volume dos materiais em m³ do concreto de referência.

Tabela 3 - Volume dos materiais em m³ do concreto de referência, (Oliveira *et al.* 2018).

Consumo de materiais (Kg/m³ de concreto)					
Cimento	**Silica ativa**	**Areia média**	**Brita 1**	**Água**	**Superplastificante**
466,70	51,80	763,10	1088,60	160,10	4,67

As Figuras 1 e 2 apresentam as distribuições granulométricas discretas de seus materiais que foram aplicados no modelo de empacotamento de Alfred e assim foi determinada a curva granulométrica do CAD de referência e do otimizado. Nos dois concretos o coeficiente de distribuição (q) foi de 0,29.

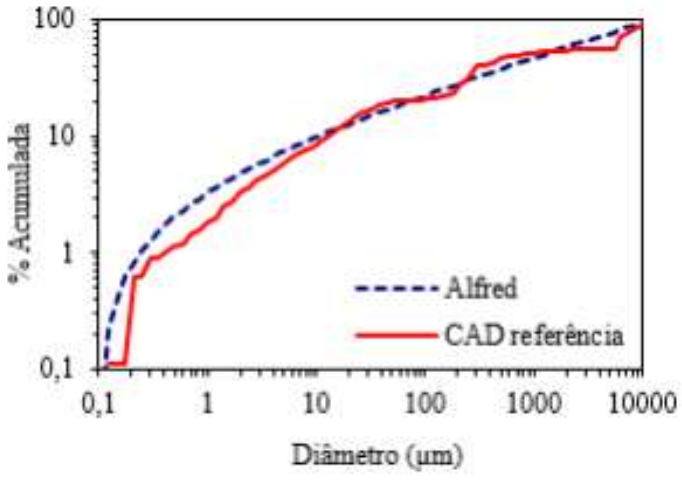


Figura 1 - Curva granulométrica do concreto de referência, (Oliveira *et al.* 2018).

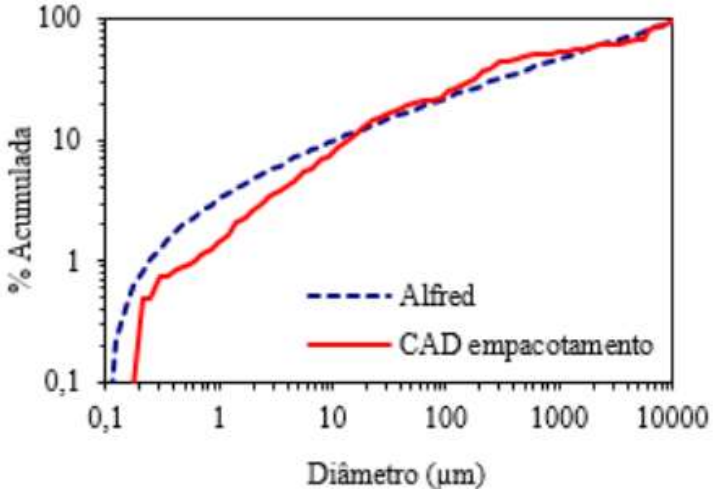


Figura 2 – Curva granulométrica do concreto do concreto otimizado, (Oliveira *et al.* 2018).

Conclui-se que na otimização do CAD com base no empacotamento de partículas, novos materiais foram necessários para preencher as lacunas em tamanhos de partículas ausentes no concreto de referência de alta resistência. Isso resultou em uma demanda maior de aditivo superplastificante para melhorar o empacotamento. O CAD otimizado com base no empacotamento de partículas apresentou menor índice de intensidade de ligante, tornando uma opção mais sustentável que o CAD de referência. Como resultado do CAD no estado endurecido, a porosidade foi reduzida e a resistência a compressão aos 28 dias foi aumentada significativamente.

Lopes *et al.* 2020

A construção civil tem uma grande importância na atividade econômica mundial, destaca-se o concreto de cimento Portland como o material da construção mais consumido globalmente, ficando atrás apenas da água em termos de consumo. O concreto é utilizado em várias obras da engenharia como por exemplo pontes, edifícios, usinas hidrelétricas entre outros.

O desenvolvimento da tecnologia do concreto é impulsionado pela demanda do mercado, levando os profissionais a explorarem novas metodologias para melhorar as suas propriedades. Um conceito chave introduzido é o empacotamento de partículas, que é aplicado em engenharia, especialmente em materiais de alto desempenho.

Devido a utilização de partículas de materiais naturais e industriais na construção civil o conceito de empacotamento de partículas tem sido muito utilizado em estudos. O empacotamento adequado de partículas afeta a densidade dos materiais, influenciando as propriedades como durabilidade e desempenho mecânico. O empacotamento de partículas não considera apenas o tamanho das partículas, mas também fatores como morfologia, porosidade e estado de dispersão de partículas. Partículas finas como a de cimento, tendem a formar aglomerados, o que pode afetar a trabalhabilidade do concreto. Aditivos químicos frequentemente são utilizados para dispersar as partículas.

São utilizados modelos matemáticos para fazer o empacotamento de partículas, incluindo modelos de partículas esféricas e modelos que tratam as partículas como distribuições contínuas. Destaca-se o modelo de Alfred, que introduziu o conceito de tamanho mínimo de partícula, destacando-se na dosagem de concretos por possuir maior eficiência de empacotamento e ser mais condizente com sistemas particulados reais.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência do empacotamento de partículas de misturas de concretos de cimento Portland utilizadas na construção civil, obtidas através dos métodos de dosagens tradicionais.

O estudo tem como programa experimental fabricar três tipos de concreto: nomeados por C25 R, C40 R e o concreto de alta resistência C80 R. Com as proporções e as distribuições constituintes desses concretos definidos, foi utilizado o modelo de empacotamento de Alfred para descobrir o coeficiente de distribuição.

Nos três concretos foi utilizado o cimento CPII Z 32, com a massa específica de 3,05 Kg/dm³, no C80 R foi utilizado a sílica ativa, com massa específica de 2,21 Kg/dm³. Em todos os concretos foram utilizados dois tipos de agregado miúdo areia fina e média com massa específica de 2,58 Kg/dm³ e 2,57 Kg/dm³ respectivamente.

Nos concretos C25 R, C40 R e C80 o agregado graúdo utilizado foi a brita 1 com amassa específica de 2,96 Kg/dm³, Todas as misturas utilizaram a água da rede de abastecimento do local. A relação água/cimento foi de 0,15 sendo iguais para todas as misturas e o aditivo plastificante foi utilizado nas misturas C25 E e C40 R e o superplastificante no C80 R, os dois aditivos são à base de policarboxilatos. Através dos dados foram feitos testes para descobrir qual o coeficiente de distribuição se adaptaria melhor aos concretos para C25 R e C40 R o coeficiente de

distribuição (q) ficou entre 0,20 e 0,25 e o C80 R o q foi de 0,16. As Figuras 3, 4 e 5 apresentam o empacotamento de partículas no modelo de Alfred.

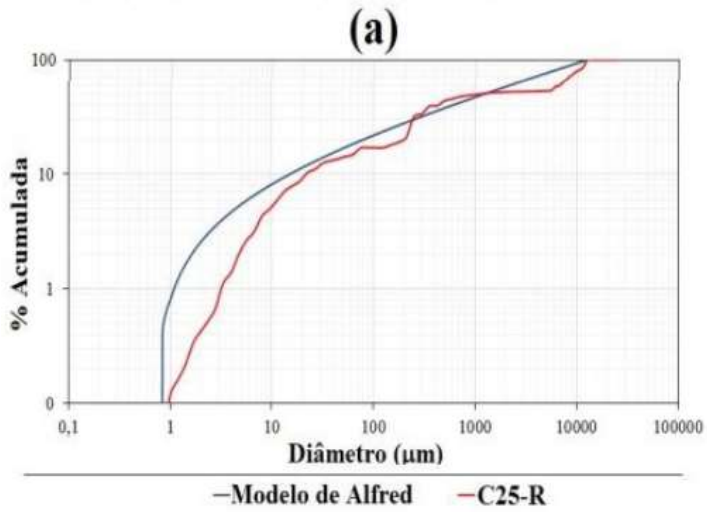


Figura 3 - Empacotamento de partículas, modelo de Alfred do C25 R, (Lopes; Peçanha; Castro, 2020).

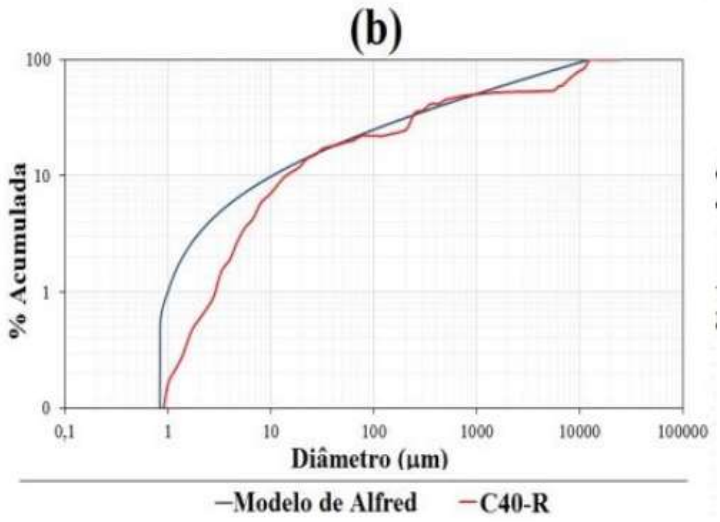


Figura 4 - Empacotamento de partículas, modelo de Alfred - C40 R, (Lopes; Peçanha; Castro, 2020).

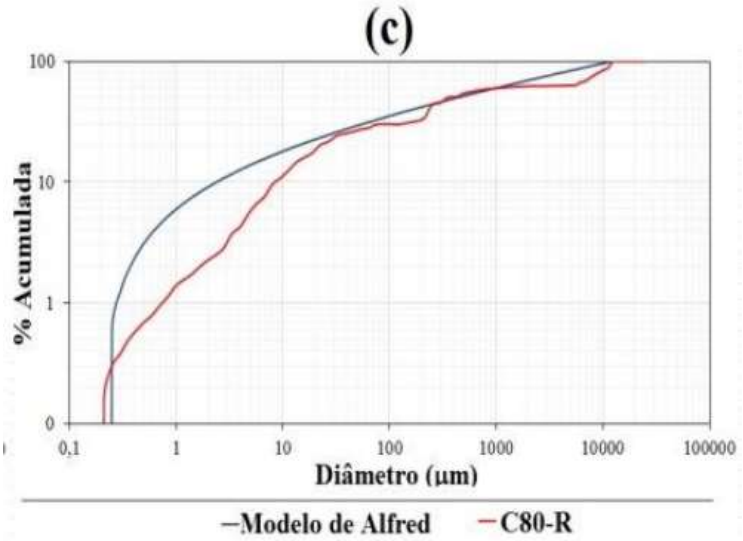


Figura 5 - Empacotamento de partículas, modelo de Alfred do C80 R, (Lopes; Peçanha; castro, 2020).

Conclui-se que a aplicação do modelo de empacotamento de Alfred resulta em coeficientes de distribuição de diferentes valores dos tradicionais para concretos adensados por vibração, devido à simplificação do modelo teórico. A otimização das dosagens melhora as propriedades de durabilidade e desempenho mecânico, mas reduz a trabalhabilidade, exigindo mais aditivos para alcançar a consistência desejada no estado fresco.

A implementação de modelos de empacotamento, com seleção adequada de materiais, é vista como uma maneira de aumentar a eficiência no uso do cimento, melhorar o desempenho mecânico e tornar o concreto mais sustentável.

Souza *et al.* 2023

O Brasil ocupa o quarto lugar como um dois maiores produtores de pedras do mundo. A abundância de resíduos provenientes das indústrias de rochas ornamentais, aliada às suas características variadas conforme a região, ressalta a urgência na caracterização desses materiais e na pesquisa para sua implementação em novos compósitos. A utilização de resíduos em concreto não apenas proporciona uma destinação ambientalmente adequada para esses materiais, mas também pode reduzir os custos de produção, minimizar a exploração de recursos naturais e promover um modelo de economia circular. Além disso, essa prática contribui para o

cumprimento de políticas públicas ambientais e sociais, possibilitando que o produto final obtenha certificações de sustentabilidade, como o selo verde.

No entanto, é fundamental reconhecer que apenas incorporar resíduos reciclados ou reduzir o consumo de materiais convencionais não garante resultados satisfatórios. Portanto, é crucial avaliar como as propriedades das adições minerais influenciam o comportamento reológico, de hidratação e mecânico dos compósitos cimentícios que contêm essas cargas à base de resíduos. É necessário também comparar o benefício sustentável real da adição desses resíduos com outras formulações de concreto.

A compreensão detalhada das propriedades dos materiais cimentícios é essencial para o controle e aprimoramento de suas características, visando melhorar suas aplicações práticas. No entanto, é crucial destacar que a simples descrição das propriedades dos materiais não é suficiente para explicar o potencial de redução dos impactos ambientais do concreto. Portanto, a medição da ecoeficiência se torna imprescindível para orientar a seleção de materiais e proporções adequadas, facilitando a tomada de decisões sustentáveis nesse contexto.

No presente estudo o resíduo de rocha ornamental foi inserido no cimento e para reduzir a quantidade de cimento no concreto. Para diminuir a porosidade do concreto foi utilizado o método de empacotamento de Alfred. Para o estudo de empacotamento foi elaborada uma planilha com todos os parâmetros da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR (Norma Brasileira) 15823-1/2023 e EFNARC/2005. A Figura 6 apresenta o empacotamento de Alfred das misturas.

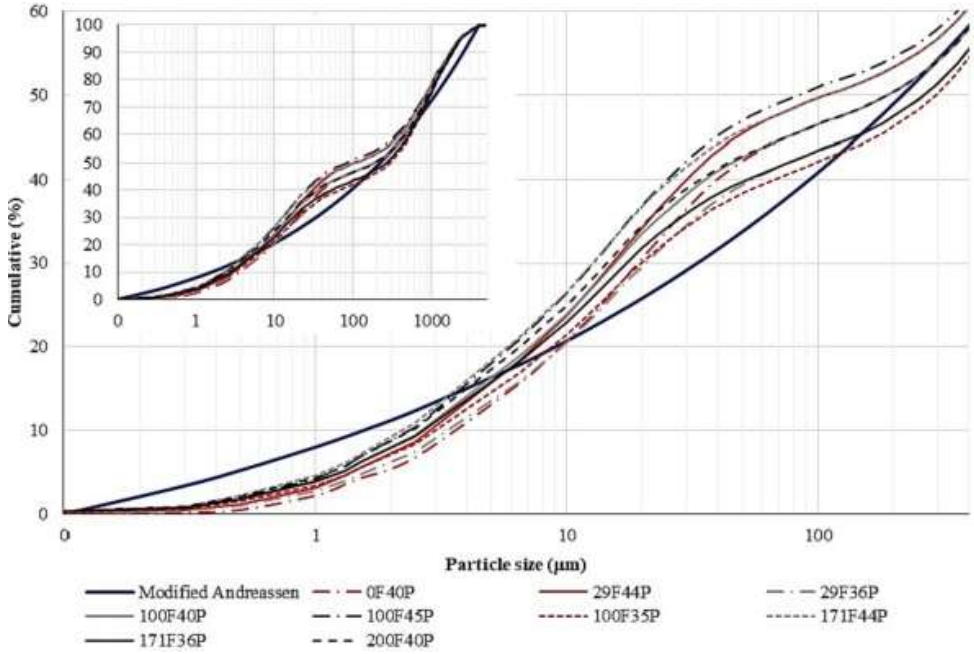


Figura 6 - Curva de distribuição granulométrica secas.

100F40P – 20% de resíduo de rocha ornamental
171F36P – 22,99% de resíduo de rocha ornamental
100F45P – 22,5% de resíduo de rocha ornamental
200F40P – 27% de resíduo de rocha ornamental
29F44P – 9,86% de resíduo de rocha ornamental
100F35P – 17,5% de resíduo de rocha ornamental
29F36P – 8,26% de resíduo de rocha ornamental
171F44P – 27,45% de resíduo de rocha ornamental

A curva da figura 6 na cor preto representa a curva de Alfred as demais linhas representam as composições, quanto mais próximo as misturas estiverem das curvas melhor é o empacotamento.

Concluiu-se que as misturas que mais se adequaram à curva de empacotamento exibiram menor índice de vazios. O incremento do teor de pó nos microconcretos provocou uma redução na densidade de empacotamento das partículas, o que resultou em um aumento do índice de vazios e, por conseguinte, uma diminuição na resistência mecânica. O resíduo de rocha ornamental tem boa função de empacotamento, preenchendo vazios e substituindo o cimento, diminuído a viscosidade e aumentando a trabalhabilidade.

A diminuição na resistência mecânica não correspondeu proporcionalmente ao aumento do resíduo de rocha ornamental. Com base nos resultados dos testes de Difração de Raios X e calorimetria, foi observado que o resíduo de rocha ornamental possui potencial para aprimorar as características mecânicas, mesmo sendo considerado inerte. Isso se deve ao efeito de filler, que promove um melhor empacotamento, e ao aumento da hidratação das partículas de cimento, resultando em nucleação heterogênea.

Embora contribua para a porosidade da mistura e reduza sua resistência mecânica, é importante notar que todas as misturas contendo OSW alcançam a resistência mecânica mínima necessária para serem consideradas como concreto estrutural. Isso evidencia que microconcretos com elevadas taxas de substituição do cimento por esse resíduo de carga podem ser não apenas viáveis, mas também mais ecologicamente sustentáveis.

Os microconcretos com baixo teor de cimento apresentam-se como uma das opções mais ecologicamente eficientes na literatura, especialmente dentro da categoria de concreto autoadensável com resistência convencional (Classes 20 e 30).

Para um concreto autoadensável de baixo custo e consumo reduzido de cimento, com alta utilização de resíduos, a resistência pode compensar durante sua produção. Isso resulta em um concreto mais fluido que dispensa a necessidade de equipamentos de compactação, reduzindo assim a necessidade de mão de obra durante a concretagem. Além disso, essa formulação também diminui o calor gerado pela hidratação dos materiais cimentícios. Essas características permitem uma ampla gama de aplicações, incluindo elementos estruturais, peças finas e esbeltas, e rejuntes, enquanto mantém a sustentabilidade como prerrogativa fundamental.

2.6.4. MÉTODO DE DOSAGEM DE OKAMURA E OUCHI

O método de Okamura e Ouchi sugerem que antes de fazer o concreto autoadensável podem ser feitos argamassas para corrigir possíveis falhas nas proporções dos materiais. O método baseia-se em três princípios: conteúdo limitado de agregado graúdo no contexto, baixa relação água/finos e o uso de plastificante. Esses princípios têm por objetivo de proporcionar alta fluidez na pasta, além de

evitar segregação quando a mistura fluir entre as armaduras (Okamura; Ouchi, 2003). A Figura 7 ilustra o ensaio com o mini *slump* que é feito para corrigir possíveis falhas nas proporções dos materiais.

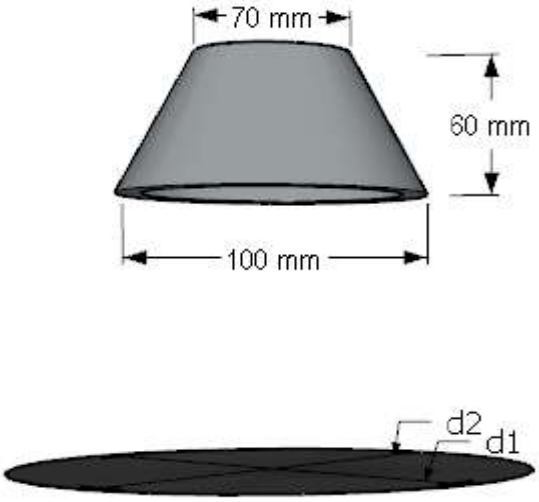


Figura 7 - Ensaio de Mini Slump. (Okamura; Ouchi, 2003)

A restrição quanto à limitação do agregado graúdo justifica-se pelo alto consumo de energia quando as suas partículas estão próximas umas das outras, provocando colisões e obstruções em regiões com obstáculos. Quando o conteúdo de agregado é maior, a tensão no interior do concreto aumenta, fazendo com que a energia necessária ao concreto para fluir seja consumida para estabilização dos agregados no interior da mistura (Okamura; Ouchi, 2003). A Figura 8 apresenta características de fabricação do concreto autoadensável.

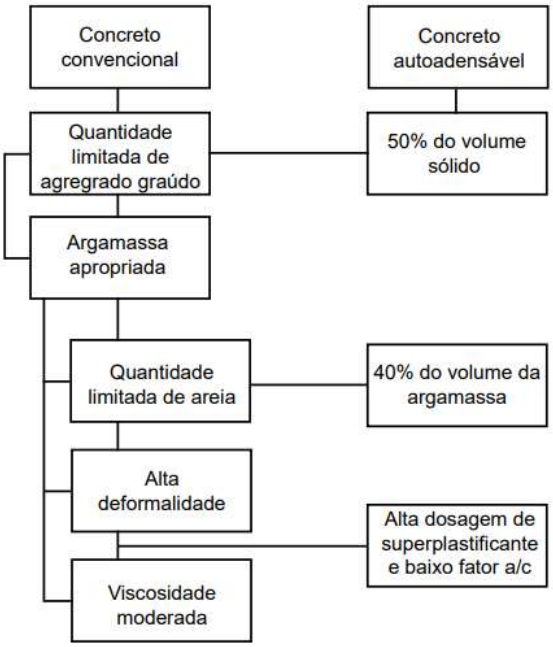


Figura 8 - Características de fabricação do concreto autoadensável, (Okamura, Ouchi, 2003).

A Figura 9 apresenta a comparação da dosagem do concreto convencional e o concreto autoadensável.

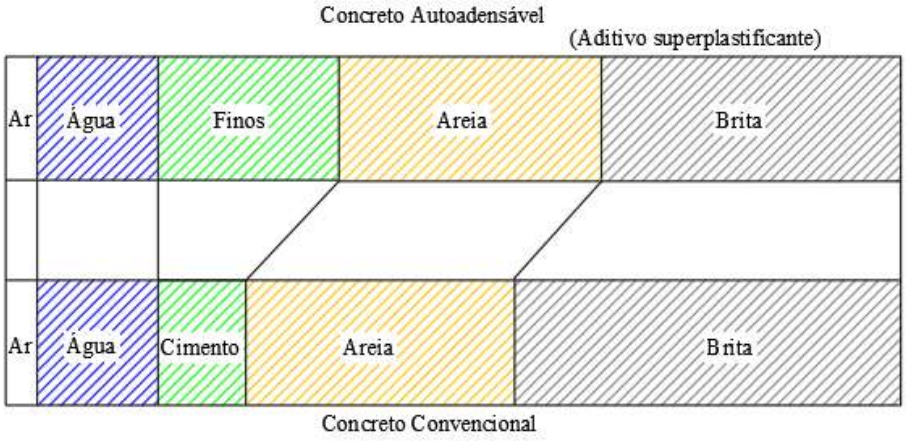


Figura 9 - Comparação entre o concreto convencional e o concreto autoadensável, (Okamura; Ouchi, 2003).

A quantidade de superplastificante necessária, em relação aos materiais finos (Sp/mf), e a relação entre água e materiais finos (V_a/V_f), ambas medidas em volume, são determinadas por meio de testes realizados na argamassa. Durante esses testes, são ajustadas a dosagem do superplastificante e a proporção de água em relação aos materiais finos para alcançar propriedades específicas, como alta fluidez

e viscosidade moderada, que são requeridas para a argamassa. (Gomes; Barros, 2009).

Os parâmetros que definem a fluidez é o Gm que é medido através do ensaio do tronco de cone de consistência. O Gm é determinado usando duas medidas perpendiculares do diâmetro de espalhamento, sendo d_1 e d_2 os diâmetros de espalhamento da argamassa e o d_0 que é o diâmetro da base do cone, como mostra a Equação 5 (Gomes apud Takada *et al.* 2009).

$$\text{Gm}= (\frac{D_m}{D_0})^2 - 1 \qquad (5)$$

Gm= Diâmetro de espalhamento;

Dm = Média dos diâmetros do microconcreto;

D_0 = Diâmetro do mini cone.

2.6.5. MÉTODO EFNARC

O CAA foi desenvolvido no Japão, isso ocorreu devido ao desenvolvimento de uma tecnologia anterior que foi o superplastificante para concreto. O CAA passou a ser utilizado na Europa em obras de concreto pré-moldado e "*in loco*". A prática da aplicação do CAA foi acompanhada por várias pesquisas sobre as características físicas e mecânicas essa gama de conhecimento gerado se tornou a EFNARC que é uma norma europeia que define os requisitos específicos para o CAA, sua composição e aplicação. (EFNARC, 2005).

Algumas das exigências que a EFNARC impõe para à produção, composição e aplicação do CAA são:

- Os constituintes do CAA devem satisfazer as exigências da EN 206-1 (Especificação, desempenho, produção e conformidade do concreto).
- Os cimentos utilizados têm que estar de acordo com as exigências da norma EM 197-1 (Composição, especificações e critérios de conformidade do cimento). A seleção do tipo de cimento depende dos requisitos gerais do concreto, como resistência e durabilidade dentre outros. O consumo de cimento é de 350 kg/m³ a 450 Kg/m³, pois acima deste valor, pode causar retração excessiva e abaixo

só poderá ser utilizado com a adição de um outro material cimentício, tal como: cinza volante ou pozolana.

- Os agregados devem satisfazer a norma EN 12620 todas as areias podem ser utilizadas para a fabricação do CAA, contanto que não apresentem agentes nocivos e impurezas. Geralmente o agregado graúdo tem a dimensão de 16 mm a 20 mm;
- A água deve cumprir a norma EN 1008 (água para concreto);
- Os aditivos químicos como por exemplo os superplastificantes tem que atender a norma EN 934-2;
- Os aditivos minerais ou adições minerais, como os fílers de agregados e pigmentos devem atender as exigências das normas EN 12620 (Agregados para concreto); EN 450 (Definições, exigências e controle de qualidade de cinza volantes para concreto); EN 13263 (Definições, exigências e controle de qualidade da sílica ativa para concreto).

As propriedades do CAA que são analisadas no estado fresco são: capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre os obstáculos e resistência à segregação. Para o concreto ser considerado autoadensável todas estas exigências citadas anteriormente devem ser atendidas. Essas propriedades podem ser caracterizadas usando técnicas já conhecidas, a partir de equipamentos de ensaios específicos para o CAA. Dentre eles são utilizados vários tipos de ensaios existentes, os mais utilizados são: Para caracterizar a capacidade de fluxo são recomendados os Ensaios de espalhamento, *Slump flow test* e *V-Funnel* (Funil V), e para capacidade de passagem por obstáculos são recomendados a *L – Box* (Caixa L), Tubo em U e o teste de autoadensabilidade. Para a resistência a segregação são utilizados os ensaios Funil V e GTM. Na Tabela 4 são apresentadas às faixas de valores típicos para o CAA adotados pela EFNAR.

Tabela 4 - Faixas de valores típicos para o CAA adotados pela (EFNARC,2005).

Propriedades	**Ensaios**	**Unidades**	**Faixas típicas dos parâmetros**	
			Mínimo	**Máximo**
Capacidade de preenchimento das formas	Espalhamento do cone de Abrans	mm	550	850
	T_{500}	Seg.	2	25
	Funil V	Seg.	2	25
Capacidade de passagem pelos obstáculos	Caixa L	(H2/H) mm	0,8	1
	Caixa U	(H2/H) mm	0	30
	Anel J	mm	0	50
Resistência à segregação	Funil V	Seg.	25	25

2.6.6. MÉTODO DE DOSAGEM PETERSON, BILLBERG E VAN

O método proposto consiste na determinação de um esqueleto granular e um mínimo volume de pasta, que garanta a autoadensabilidade ao concreto, comprovada pela habilidade que o concreto tem em passar pelas armaduras impostas do ensaio da Caixa L e pelo valor adequado do ensaio de espalhamento. As quantidades de superplastificantes, águas e finos são ajustados para alcançar a resistência de compressão desejada, obter a viscosidade necessária e uma baixa tensão de cisalhamento compatível com o autoadensamento do concreto (Gomes; Barros, 2009)

O método de dosagem é calculado pela quantidade mínima da pasta para determinado espaço livre entre as armaduras é utilizado o fíler para criar a quantidade da pasta necessária. Foram feitos vários testes com agregados com diâmetros máximos diferentes, mantendo-se constante a quantidade de pasta. Foi estudada também a possibilidade de substituir um percentual de fíler da mistura por agente modificador de viscosidade. O método de dosagem estabelece a quantidade necessária de pasta que deve ser utilizado para evitar o bloqueio (Gomes; Barros, 2000). O método de dosagem simplificado do CAA, proposto por Peterson, Billberg e Van está esboçado na Figura 10.

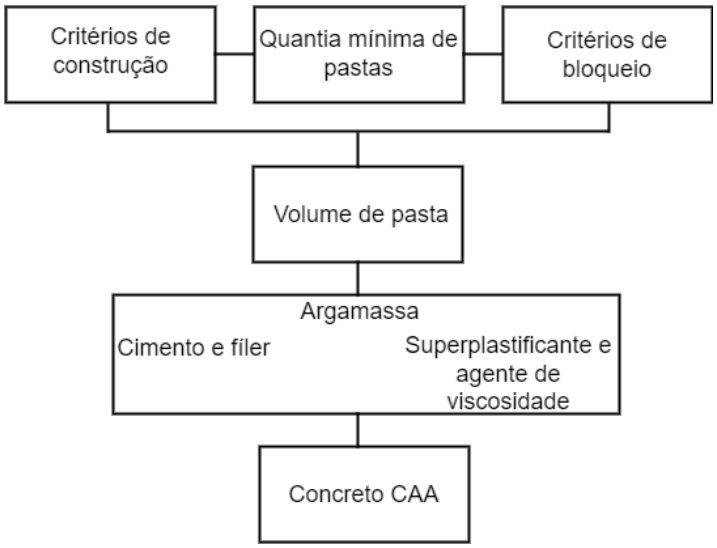


Figura 10 - Método de dosagem simplificado do CAA (Gomes; Barros, 2009).

2.6.7. CRITÉRIOS PARA A CONSTRUÇÃO

Através de cada exigências do projeto os critérios de construção são estabelecidos como por exemplo, a resistência do concreto, durabilidade e espaçamento entre as armaduras. A etapa de definição dos critérios segue a mesmas especificações das que são utilizadas no concreto convencional, existe uma pequena diferença que é o espaçamento crítico entre as armaduras e/ou seções de formas complexas do elemento estrutural que venham apresentar obstáculos a ser vencido pelo CAA (Gomes; Barros, 2009).

Através da medição da quantidade de vazios em diferentes relações entre agregado graúdo e agregado miúdo, é determinado o volume mínimo de pasta da mistura. O esqueleto da composição granular não afeta somente o volume de vazios, mas também a superfície específica total dos agregados (Gomes; Barros, 2009).

Segundo Gomes; Barros, (2009) apud Peterson *et al.* (1996), o volume mínimo da pasta deve envolver todos os vazios do esqueleto granular e envolver todas as superfícies das partículas dos agregados. Ainda segundo os autores, duas composições diferentes entre agregados podem apresentar diferentes áreas específicas, mesmo que ambas possuam o volume de sólido igual. Assim para promover a mesma deformabilidade entre duas misturas, quanto maior a superfície

específica dos agregados maior vai ser o volume da pasta para a cobertura das partículas.

2.7. ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO

A Tabela 5 abaixo mostra os ensaios e suas respectivas funções. Estes ensaios serão feitos durante o projeto de acordo com a norma da ABNT NBR 15823-1/2017.

Tabela 5 - Ensaios e suas propriedades, (Tutikian; Molin,2008)

Ensaios	**Propriedades**
Espalhamento pelo Cone de Abrans – *Slump Flow*	Capacidade de preenchimento
Caixa L	Capacidade de escoamento
Anel J	
Funil V	Resistência à segregação

2.8. REPARO COM MICROCONCRETO AUTOADENSÁVEL

As estruturas são construídas para atenderem as condições de utilização e não para apresentarem problemas, que com o decorrer do tempo possam comprometer as suas funções para quais foram planejadas. Sendo assim, as construções das estruturas devem atender os requisitos mínimos de qualidade baseados em normas técnicas garantindo a resistência, durabilidade e desempenho de serviço (Fugiyama *et al.* 2021).

Em alguns casos a estrutura de concreto pode apresentar alguma patologia fazendo-se necessário o uso da aplicação de reparo para resistir a cargas que não estavam previstas no projeto, corrigir perda de resistência devido a deterioração, corrigir erro de projeto, construção e aumentar a ductibilidade. Atualmente existem várias técnicas de reforço como por exemplo pontes de aderência, protetores anticorrosivos, argamassa de reparo, realcalinizantes entre outros (Fugiyama *et al.* 2021), (Bacarji *et al.* 2019).

A necessidade de se atingir maiores resistência com estruturas mais leves, duráveis e sustentáveis fez com que os pesquisadores da construção civil

buscassem por novas tecnologias aplicadas ao concreto. Para atender essa demanda criou-se o microconcreto, um tipo de concreto que possui altos valores de resistência a compressão pois a mistura é composta por materiais mais finos, sendo alguns desses materiais aproveitados de processos de produção (Bacarji *et al.* 2018).

A preservação dos recursos naturais é um tema que causa muita preocupação e há alguns anos tem sido discutido entre os pesquisadores. Os recursos naturais precisam ser utilizados, porém garantindo que os mesmos não se esgotem, para que futuramente as próximas gerações possam utilizá-los. Por isso, na construção civil e cada vez mais comum a utilização de adições minerais de resíduos provenientes de processos de britagem na produção do concreto. A função destes resíduos é substituir parcialmente ou totalmente o volume de agregados miúdos a fim de reduzir o impacto ambiental proveniente da extração de recursos naturais da natureza, e ainda possibilitam manter as características do concreto produzido com areia natural (Kitamura, 2011).

2.9. EXEMPLOS DE ESTUDOS COM RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS INCORPORADOS EM CONCRETO

Neste capítulo foi abordado alguns estudos realizados com a substituição parcial da areia em concretos convencional e em concretos autoadensáveis.

Singh; aggarwal, 2022

O estudo teve como objetivo substituir porcentagens de resíduo de mármore e granito no cimento e na areia, respectivamente. No estudo foram feitos ensaios de composição do granito, ensaio do concreto no estado fresco (tronco de cone), e endurecido, a resistência à compressão e à flexão. A Tabela 6 apresenta a composição química do pó de granito.

Tabela 6 - Composição química do pó de granito, (Singh; Aggarwal, 2022).

Constituintes	**Porcentagem dos elementos no resíduo de granito**
Feldspato	65-90%
Quartzo	10-60%
Biotita	10-15%
Sílica	70-77%
Alumina	11-13%
Óxido de potássio	3-5%
Carbonato de sódio	3-5%
Cal	1%

Neste estudo inclui quatro misturas de concreto que foram preparadas e nomeadas de acordo com a classificação do concreto. A Tabela 7 apresenta a formação sequencial das misturas.

Tabela 7 - Formação sequencial das misturas, (Singh; Aggarwal, 2022).

Id. da mistura	**Cimento (Kg)**	**Resíduo de mármore (Kg)**	**Resíduo de granito (Kg)**	**Areia (Kg)**	**Brita (Kg)**	**Relação a/c**
M_0G_0	394	0	0	635	1129,2	0,5
$M_{10}G_{25}$	354,6	45,23	159,97	476,25	1129,2	0,5
$M_{20}G_{50}$	315,2	90,47	320	317,75	1129,2	0,5
$M_{30}G_{100}$	275,8	136	635	0	1129,2	0,5

M_0G_0 − 0% Mármore e 0% Granito.

$M_{10}G_{25}$ − 10% Mármore e 25% Granito.

$M_{20}G_{50}$ − 20% Mármore e 50% Granito.

$M_{30}G_{100}$ − 30% Mármore e 100% Granito.

Os testes de resistência à compressão e à flexão foram avaliados com as idades de ruptura de 7 e 28 dias, o trabalho experimental inclui as quatro misturas de concreto, o concreto de referência e três misturas com diferentes variações com as porcentagens de pó de mármore e granito no cimento e na areia respectivamente. A Tabela 8 mostra o tamanho e quantidade de amostra de cada mistura.

Tabela 8 - Tamanho e quantidade de amostra de cada mistura, (Singh; Aggarwal, 2022).

Forma e tamanho das amostras	**Idade das amostras**	**Substituição do cimento e da areia por pó de granito e mármore**				**N° total das amostras**
Testes de resistência â compressão 150 x 150 x 150 (mm)	7	M_0G_0	$M_{10}G_{25}$	$M_{20}G_{50}$	$M_{30}G_{10}$	24
		3	3	3	3	
	28	3	3	3	3	
Vigas para teste de resistência a flexão 100 x 100 x 500 (mm)	7	3	3	3	3	24
	28	3	3	3	3	

A trabalhabilidade do concreto para os quatro traços foi examinada através do ensaio de abatimento, mostrado na Tabela 9. A cada nível de substituição do pó de mármore e de granito no cimento e na areia o valor do abatimento aumenta quando comparado a mistura de referência.

Tabela 9 - Resultado do ensaio de abatimento, (Singh; Aggarwal, 2022).

Identificação da mistura	**Valor observado em (mm)**
M_0G_0	80
$M_{10}G_{25}$	82
$M_{20}G_{50}$	85
$M_{30}G_{100}$	90

No ensaio do concreto no estado endurecido foram feitos os ensaios de resistência à compressão e á flexão, as Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados dos ensaios respectivamente.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de resistência à compressão, (Singh; aggarwal, 2022).

Identificação da mistura	**7 dias de resistência à compressão em N/mm²**	**28 dias de resistência à compressão em N/mm²**
M_0G_0	18	28,21
$M_{10}G_{25}$	21,18	32,41
$M_{20}G_{50}$	17,8	27,01
$M_{30}G_{100}$	16,5	26,1

Tabela 11 - Resultado do ensaio de resistência à flexão, (Singh; Aggarwal, 2022)

Identificação da mistura	**7 dias de resistência à flexão em N/mm²**	**28 dias de resistência à flexão em N/mm²**
M_0G_0	5,1	6,2
$M_{10}G_{25}$	7,2	8,2
$M_{20}G_{50}$	5	6,1
$M_{30}G_{100}$	4,8	5,8

A mistura $M_{10}G_{25}$ aumenta a resistência à compressão e flexão, em relação a pasta de referência e as demais misturas diminuem as propriedades citadas acima em relação ao concreto de referência. Esses resíduos foram reaproveitados de forma a evitar problemas ambientais relacionados ao descarte e conservar os recursos naturais.

Jain; Guptar; Chaudhary, 2019

Neste estudo foram avaliadas as propriedades no estado fresco e endurecido de concreto autoadensável contendo corte de granito. O resíduo foi utilizado na substituição parcial da areia em 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, os ensaios no estado fresco que foram feitos são: $T_{500,}$ Funil V, Caixa L, e Anel J, no estado endurecido os testes feitos foram resistência à compressão, resistência à flexão, velocidade do pulso ultrassônico, absorção de água e permeabilidade à água.

Para saber a composição química e mineralógica do agregado miúdo e do resíduo foram feitos os ensaios de Espectrometria de Raio x e Difração de Raio x. Abaixo a Tabela 12 mostra o resultado da composição elementar do agregado miúdo e do resíduo de corte de granito.

Tabela 12 - Composição elementar do agregado miúdo e resíduo de granito, (Jain; Guptar; Chaudhary, 2019)

Elemento (símbolo)	Agregado miúdo	Resíduo de granito
Oxigênio (O)	44,21	51,53
Silício (Si)	31,87	24,34
Alumínio (Al)	13,24	11,27
Sódio (Na)	0,79	3,93
Carbono (C)	5,61	2,27
Potássio (K)	4,28	1,23
Ferro (Fe)	-	2,99
Magnésio (Mg)	-	0,91

As Figuras 11 e 12 apresentam a composição mineralógica do agregado miúdo e do resíduo, respectivamente.

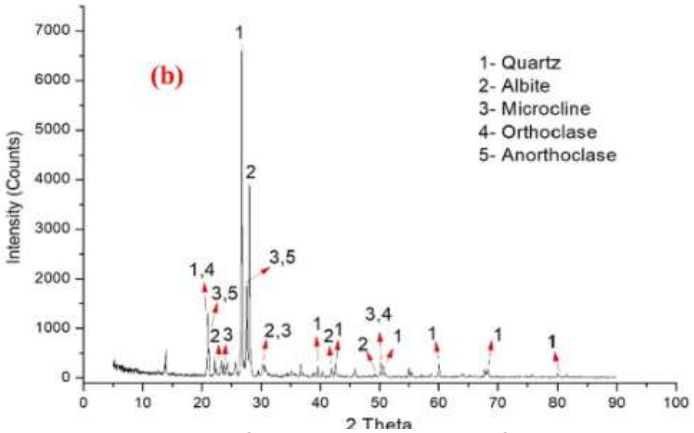


Figura 11 - Composição mineralógica do agregado miúdo, (Jain; Guptar; Chaudhary; 2019)

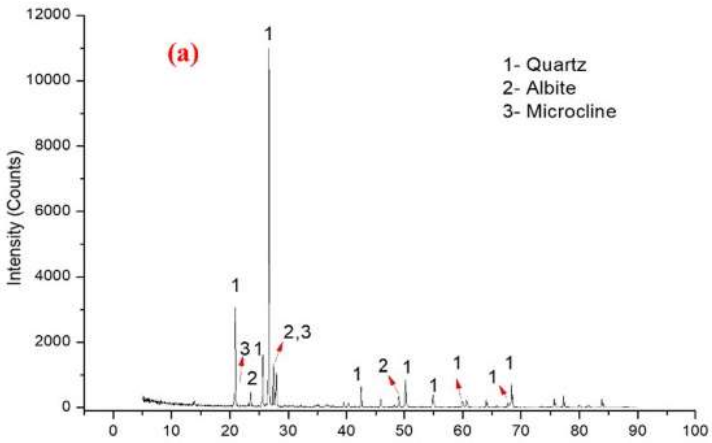


Figura 12 - Composição mineralógica do resíduo de rocha ornamental, (Jain; Guptar;2019) (Chaudhary, 2019)

A proporção das misturas é mostrada na Tabela 10, foram feitas 6 combinações, uma mistura foi preparada sem o resíduo de granito, essa foi nomeada de concreto de controle (Go), enquanto as outras composições foram preparadas para diferentes porcentagens de resíduo, a nível de substituição foram nomeadas G_{20}, G_{40}, G_{60}, G_{80}, G_{100}, cada numeração representa a porcentagem de resíduo que cada uma mistura possui. Em todas as misturas a proporção de cimento e água foram iguais, no concreto foi modificada a proporção de superplastificante. A Tabela 13 apresenta detalhes das proporções das misturas em Kg/m³.

Tabela 13 - Detalhes das proporções das misturas em Kg/m³ (Jain; Guptar; Chaudhary, 2019).

Identificação da mistura	**Cimento**	**Areia**	**Resíduo de granito**	**Água**	**Superplastificante**
G_0	546,79	845,29	0	202,31	1,35
G_{20}	546,79	676,21	169,05	202,31	1,35
G_{40}	546,79	507,16	338,10	202,31	1,35
G_{60}	546,79	338,1	507,16	202,31	1,8
G_{80}	546,79	168,95	676,21	202,31	2,2
G_{100}	546,79	0	845,26	202,31	2,7

Foi feito o ensaio do *slump flow* e para todas as misturas o diâmetro do concreto variou entre o 670 e 715 mm, que se enquadram na classe de fluxo SF_2, de acordo com a norma da EFNARC. A dosagem de superplastificante foi variada de modo a manter constante o diâmetro dos valores do fluxo. A Tabela 14 mostra os resultados dos demais ensaios feitos no CAA no estado fresco.

Tabela 14 - Resultados dos testes de características no estado fresco do CAA com o desvio padrão (Jain; Guptar; Chaudhary, 2019).

Identificação das misturas	**Fluxo de queda**	**T_{500} Tempo (seg.)**	**Funil V (seg.)**	**Anel J**	**Caixa L**
G_0	700±4,95	3,97±0,04	7,87±0,06	2,5±0,35	0,94±0,007
G_{20}	705±3,54	3,15±0,08	6,15±0,06	2,0±0,35	0,95±0,008
G_{40}	695±3,54	4,02±0,07	7,92±0,04	3,0±0,35	0,91±0,002
G_{60}	715±6,66	5,19±0,06	11,50±0,09	5,5±0,35	0,89±0,032
G_{80}	970±3,54	7,45±0,07	16,88±0,10	9,0±0,35	0,85±0,020
G_{100}	684±7,07	8,01±0,04	21,01±0,05	11,50±0,35	0,79±0,024

Os resultados dos testes de resistência à compressão, resistência à flexão, UPV (Velocidade de Pulso Ultrassônico). Primeiro por extenso, absorção de água, porcentagem de vazios permeáveis e permeabilidade à água para todas as amostras de CAA endurecida são apresentados na Tabela 15 juntamente com os desvios padrão.

Tabela 15 - Resultados do concreto autoadensável no estado endurecido (Jain; Guptar; Chaudhary, 2019).

Teste	**Identificação das misturas**					
	G_0	**G_{20}**	**G_{40}**	**G_{60}**	**G_{80}**	**G_{100}**
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	38,67 ±0,58	40,67± 1,15	36,67± 2,08	32,00± 2,00	25,33± 1,53	21,67± 3,06
28 dias (MPa)	52,00± 2,00	55,00± 2,65	51,50± 2,18	47,50± 1,32	37,00± 1,73	31,50± 3,28
Resistência à flexão (MPa)	5,84±0 ,01	6,17±0 ,03	6,02±0 ,02	5,68±0 ,03	5,30±0 ,10	4,91±0 ,19
UPV (m/seg.)	5272,9 ±277,9	5370,0 4±320, 07	5294,1 ±509,0 4	5008,4 ±250,7	4485,9 ±239,0	4064,7 ±257,0
Absorção de água (%)	4,00±0 ,09	3,81±0 ,13	3,89±0 ,10	4,15±0 ,11	4,32±0 ,14	4,77±0 ,05
Porcentagens de vazios permeáveis (%)	9,85±0 ,20	9,68±0 ,13	9,77±0 ,20	10,15± 0,18	10,43± 0,13	10,97± 0,20
Profundidade de penetração de água (mm)	33,0±1 ,17	29,6±1 ,16	31,4±1 ,42	40,3±2 ,50	45,7±1 ,42	53,0±2 ,22

O objetivo foi avaliar as características frescas e mecânicas do concreto autoadensável (CAA) composto por resíduo de corte de granito em substituição de agregado miúdo.

- As misturas que tiveram a adição de granito exigiram uma dosagem mais alta de superplastificante em relação a mistura controle.

- A incorporação de granito também afetou as características frescas das misturas, porém foram encontradas na faixa satisfatória de acordo com o padrão EFNARC, exceto a mistura preparada com 100% do resíduo de granito.
- A incorporação do granito com 20% mostrou um aumento da resistência à compressão e um declínio na resistência além de 20% de substituição. Além disso, a resistência à compressão foi comparável com 40% de substituição em relação a mistura controle;
- a resistência à flexão aumentou com 20% de substituição de granito e depois diminuiu com o incremento adicional do resíduo;
- os resultados do ensaio de velocidade ultrassônica mostraram a boa qualidade das amostras modificadas com resíduo de granito, exceto a mistura G80 e G100;
- a maior resistência de absorção de água e permeabilidade à água foram encontradas até 40% de incorporação do resíduo de granito em relação a pasta controle;
- o empacotamento foi compacto entre agregado e pasta de cimento até 40% de resíduo de granito, enquanto os vazios aumentaram com o incremento do resíduo contendo além de 40%;
- Os resultados das características frescas e endurecidas e a análise microestrutural de concreto mostraram que o resíduo de granito pode ser utilizado positivamente como alternativa ao agregado miúdo natural (ou seja, areia do rio) para a produção de misturas modificadas com granito tem características frescas e endurecidas suficientes que podem ser utilizadas para trabalhos estruturais com reforço denso. Os resultados acima permitem uma maior reciclagem de resíduo de granito com substituição do agregado miúdo, juntamente com a redução dos problemas ambientais. A utilização do resíduo de granito em CAA contribuirá na produção sustentável de produtos de concreto.

Gautam, *et al.* 2022

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade de materiais alternativos para a fabricação de concreto autoadensável. A pesquisa consiste na fabricação de

concreto autoadensável com incorporação de resíduo de cerâmica de porcelana substituindo parcialmente o cimento e resíduo de granito substituindo em diferentes porcentagens o agregado miúdo.

As Tabelas 16 e 17 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades físicas e composição química respectivamente do resíduo de porcelana, granito e areia.

Tabela 16 - Caracterização das propriedades físicas (Gautam, *et al.* 2022).

Propriedades	**Cimento**	**Resíduo de porcelana**	**Agregado miúdo**	**Agregado graúdo**	**Resíduo de granito**
Gravidade específica	3,11	2,07	2,65	2,71	2,55
Módulo de finura	-	-	1,81	5,98	1,38
Absorção de água	-	-	1	0,41	4,46
Superfície específica (Blains) / (m^2/ Kg)	361,5	425	-	-	-

Tabela 17 - Composição química dos materiais (Gautam, *et al.* 2022), modificada pela autora.

Materiais	Cimento	Resíduo de porcelana	Areia	Resíduo de rocha ornamental
SiO_2	27,25	48,02	61,89	75,93
Al_2O	12,11	13,98	11,01	11,95
Fe_2O	4,90	13,30	5,40	2,80
MnO	0,06	0,02	0,10	0,02
CaO	44,00	18,00	9,98	0,84
MgO	0,75	0,48	1,60	0,35
Na_2	0,19	0,73	0,92	2,50
K_2	1,00	1,50	1,99	4,50
TiO_2	1,20	0,22	1,10	0,29
P_2O	0,12	14,23	0,24	0,08
LOI	5,24	1,40	5,36	0,48

A mistura de concreto autoadensável de controle foi projetada realizando vários testes de acordo com os procedimentos e especificações fornecidos no EFNARC 2002 e 2005. A relação água/finos foi decidida pela mistura de controle, ou seja, 0,36 e esta relação foi mantida para todas as misturas de CAA.

No presente estudo o resíduo de porcelana e o de granito foram usados na substituição parcial do cimento e do agregado miúdo, todo o trabalho foi feito em três séries. Na primeira série o resíduo de porcelana foi utilizado para substituir o cimento nos níveis de 10%, 20%, 30% em peso. Na segunda série, o resíduo de granito foi adicionado nas quantidades de 20%, 30% e 40% em peso da areia total contida na mistura. A terceira série foi preparada pela utilização combinada do resíduo de porcelana e granito com substituto do teor de cimento e areia respectivamente. As proporções detalhadas da mistura dos ingredientes em Kg/m³ são exibidos na Tabela 18.

Tabela 18 - Proporção dos ingredientes da mistura (Kg/m³), (Gautam et al. 2022), com modificações da autora.

Id. da mistura	**Relação a/c**	**Cimento**	**Resíduo de porcelana**	**Areia**	**Resíduo de granito**	**Brita**	**Água**	**SP**
C_0G_0	0,36	550	-	975	-	691,68	200	0,9
$C_{10}G_0$	0,36	495	55	975	-	691,68	200	0,8
$C_{20}G_0$	0,36	440	110	975	-	691,68	200	1
$C_{30}G_0$	0,36	385	165	975	-	691,68	200	1,1
C_0G_{20}	0,36	550	-	780	195	691,68	200	1
C_0G_{30}	0,36	550	-	682,5	292,5	691,68	200	1,2
C_0G_{40}	0,36	550	-	585	390	691,68	200	1,4
$C_{10}G_{20}$	0,36	495	55	780	195	691,68	200	0,9
$C_{10}G_{30}$	0,36	495	55	682,5	292,5	691,68	200	1,15
$C_{10}G_{40}$	0,36	495	55	585	390	691,68	200	1,3
$C_{20}G_{20}$	0,36	440	110	780	195	691,68	200	1
$C_{20}G_{30}$	0,36	440	110	682,5	292,5	691,68	200	1,2
$C_{20}G_{40}$	0,36	440	110	585	390	691,68	200	1,5
$C_{30}G_{20}$	0,36	385	165	780	195	691,68	200	1,1
$C_{30}G_{30}$	0,36	385	165	682,5	292,5	691,68	200	1,35
$C_{30}G_{40}$	0,36	385	165	585	390	691,68	200	1,7

As propriedades frescas das misturas do concreto autoadensável têm um papel essencial na determinação da trabalhabilidade e dos resultados mecânicos. Foram feitos ensaios *slump flow*, T_{500}, Tempo de Funil V, anel J e Caixa L foram usados para avaliar o impacto do resíduo de porcelana e granito nas características do estado fresco de várias misturas de concreto autoadensável. Todos os resultados do estado fresco das misturas de concreto autoadensável estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados dos concretos autoadensáveis com as substituições, (Gautam *et al.* 2022).

Id. da mistura	**Dosagens de SP**	**Fluxo de queda**		**T_{500}**	**Funil V**	**Caixa L**	**Anel J**
C_0G_0	0,9	700		4,15	8,32	0,96	4
$C_{10}G_0$	0,8	690		3,55	7,84	0,98	3
$C_{20}G_0$	1	710		5,06	8,45	0,91	4
$C_{30}G_0$	1,1	685		6,67	9,77	0,89	5,5
C_0G_{20}	1	685		3,87	8,02	0,92	3,5
C_0G_{30}	1,2	690		5,23	9,48	0,88	5,5
C_0G_{40}	1,4	705		7,47	10,73	0,85	6,5
$C_{10}G_{20}$	0,9	710	3,95	8,34	0,95	4,5	
$C_{10}G_{30}$	1,15	705	5,35	9,74	0,91	5	
$C_{10}G_{40}$	1,3	700	6,03	10,22	0,85	6	
$C_{20}G_{20}$	1	710	5,26	8,79	0,9	4,5	
$C_{20}G_{30}$	1,2	695	5,74	9,88	0,87	6,5	
$C_{20}G_{40}$	1,5	680	7,85	11,67	0,83	8	
$C_{30}G_{20}$	1,1	690	6,77	9,45	0,88	6,5	
$C_{30}G_{30}$	1,35	700	7,94	11,05	0,82	9	
$C_{30}G_{40}$	1,7	670	9,93	13,33	0,77	11,5	

Com base nos resultados experimentais as seguintes conclusões foram tiradas:

- Todas as misturas de CAA no estudo alcançaram o fluxo adequado, a capacidade de passagem e resistência à segregação de acordo com o padrão EFNARC, exceto a mistura C_{30} $G_{40.}$ A dosagem de SP foi mais elevada para as misturas de CAA modificadas com granito.

- A inclusão do resíduo de porcelana e de granito melhoraram as propriedades de resistência à compressão. O uso combinado de C_{10} G_{30} mostraram maior resistência mecânica em comparação a mistura C_0 $G_{0.}$
- A maior resistência contra cloreto e corrosão foi observada na incorporação de até 20% de resíduo de porcelana e até 30% de resíduo de granito (separadamente). As misturas C_{10} G_{20} apresentaram menor profundidade de penetração e corrosão.

JAIN *et al.* 2020

Este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade de materiais alternativos para a fabricação de concreto autoadensável, analisar a resistência à compressão, abrasão e absorção A pesquisa consiste na fabricação de concreto autoadensável com incorporação de resíduo de granito substituindo em diferentes porcentagens o agregado miúdo.

O agregado miúdo teve o diâmetro máximo de 10 mm, e o resíduo de granito teve o tamanho máximo de 4,75 mm, foram utilizados para preparar a mistura de CAA neste estudo. Os detalhes dos materiais estão representados nas Tabelas 20 e 21.

CAA neste estudo. Os detalhes dos materiais estão representados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Propriedades físicas dos materiais (Jain *et al*. 2020).

Propriedades físicas	**Comento**	**Agregado miúdo**	**Agregado graúdo**	**Resíduo de granito**
Consistência (%)	27	-	-	-
Tempo de configuração inicial (mm)	120	-	-	-
Tempo de configuração final (mm	241	-	-	
Gravidade específica	16	2,64	2,71	2,57
Absorção de água	-	1	0,4	4,49
Módulo de finura	-	2,5	5,99	1,4

Tabela 21 – Composição química do material..

Composição elementar		Cimento	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Resíduo de granito
Oxigênio		41,91	44,21	-	51,53
Silício		19,07	31,87	-	24,34
Alumínio		1,88	13,24	-	11,27
Sódio		0,12	0,79	-	3,93
Carbono		-	5,61	-	2,27
Potássio		0,23	4,28	-	1,23
Ferro		1,23	-	-	2,99
Magnésio		0,58	-	-	0,91
Cálcio		34,93	-	-	0,53

Os resultados dos ensaios das misturas em estado fresco são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Composições do concreto.

Identificação das misturas	Fluxo de queda (mm)	T_{500} – Tempo (seg.)	Funil V - Tempo (seg.)	Anel J (cm)	Relação de altura da Caixa L
GW_0	700	3,97	7,87	2,5	0,94
GW_{20}	705	3,15	6,15	2	0,95
GW_{40}	695	4,02	7,92	3	0,91
GW_{60}	715	5,19	11,50	5,5	0,89
GW_{80}	670	7,45	16,88	9	0,85
GW_{100}	680	8,01	21,01	11,5	0,79

No estado fresco foram feitos diferentes testes de trabalhabilidade, como fluxo de queda, Tempo T_{500}, Funil em V, Anel J e Caixa L, todos os ensaios foram realizados de acordo com as diretrizes dadas nas normas da EFNARC. No estado endurecido foram feitos os ensaios de resistência à compressão, à abrasão e o teste de absorção que mede a penetração da água através da ação da ascensão capilar.

Os ensaios de resistência à compressão foram feitos em 7 e 28 dias. A Figura 13 apresenta o resultado do ensaio de resistência à compressão, a maior resistência à compressão foi encontrada na substituição parcial da areia por 20% resíduo de rocha ornamental.

.

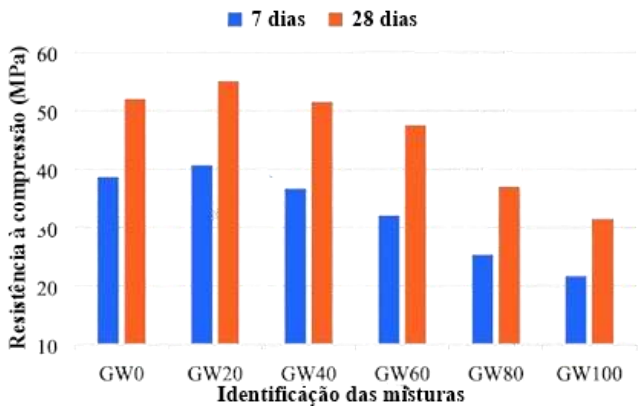


Figura 13 - Resultado do ensaio de resistência à compressão, (Jain *et al*. 2020).

Os resultados de resistência à abrasão em termos de profundidade são apresentados na Figura 14. Observa-se que a profundidade de desgaste diminui com o aumento da substituição parcial de até 40% da areia do resíduo de rocha ornamental, indicando a melhoria da resistência à abrasão a partir da substituição de 40%.

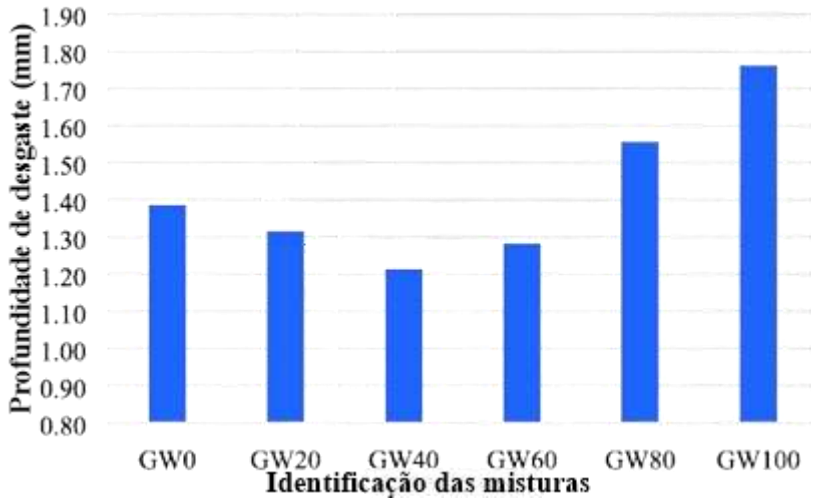


Figura 14 - Resultado de resistência à abrasão, (Jain et al. 2020).

O resultado do ensaio de absorção é apresentado na Figura 15. Os valores de coeficiente de absorção menores resultam em melhor resistência à entrada de água. Pode-se observar no gráfico a redução do coeficiente de absorção é encontrada na substituição parcial da areia do rio por 20% de resíduo de rocha ornamental. A partir daí, o incremento sistemático do coeficiente de absorção foi encontrado para maior substituição da areia por resíduo de rocha ornamental, indicando maior ingresso de água.

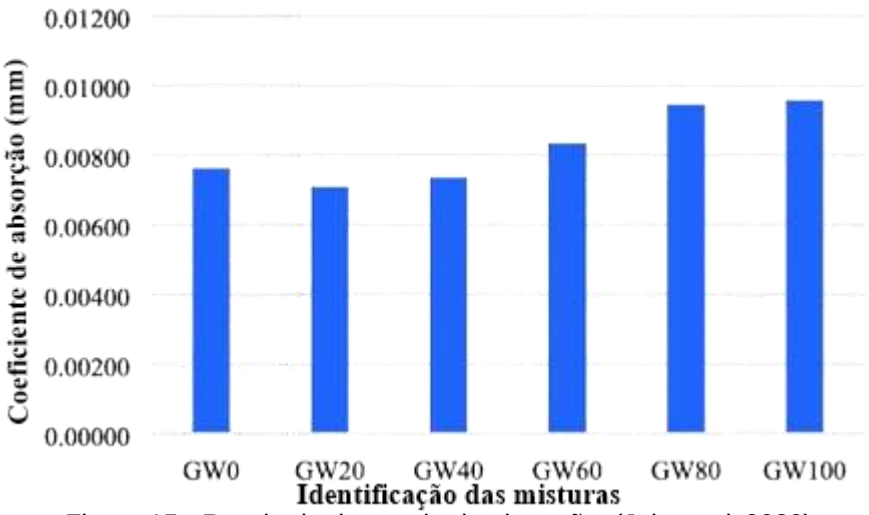


Figura 15 - Resultado do ensaio de absorção, (Jain *et al*. 2020).

Conclui-se que a substituição de até 80% da areia por resíduo de rocha ornamental pode ser utilizada satisfatoriamente em concreto autoadensáevel, confirmando o padrão EFNARC. A maior resistência à compressão foi com até 20% da substituição da areia por resíduo. A melhor resistência à abrasão do concreto autoadensável foi de até 60% de substituição da areia por resíduo de rocha ornamental. O resíduo pode ser utilizado até 40% na substituição da areia em concreto autoadensável, pois não vai comprometer a resistência à compressão, à abrasão e a característica de absorção

Khan *et al.* 2016

O trabalho tem como objetivo substituir areia natural por resíduo de rocha ornamental no concreto convencional. Neste trabalho é examinado o comportamento e a durabilidade do concreto contendo o resíduo de granito. Foram preparadas 4 porções diferentes, ou seja, 10%, 20%, 30% e 50% e foram feitos vários ensaios, como resistência à compressão, resistência à flexão e à abrasão, teste de permeabilidade e os valores experimentais foram comparados com a mistura de controle.

A Tabela 23 apresenta as proporções das misturas em Kg/m³ de mistura de concreto contendo resíduo de rocha ornamental.

Tabela 23 - Proporções de misturas (Kg/m³) de mistura de concreto contendo resíduo de granito (Khan *et al*. 2016).

Misturas	**Água**	**Cimento**	**Relação a/c**	**Areia**	**Resíduo de rocha ornamental**	**Brita**	**SP**
G_0	187,3	350,22	0,53	688,73	0	1252,35	3,5
G_{10}	187,97	350,22	0,53	619,85	68,87	1252,35	3,5
G_{20}	189,06	350,22	0,54	550,98	137,74	1252,35	3,5
G_{30}	190,1	350,22	0,54	482,10	206,61	1252,35	3,5
G_{50}	192	350,22	0,54	344,37	344,36	1252,35	3,5

Conclui-se que a substituição parcial da areia por resíduo de corte de granito produz concretos com melhores características de resistência e durabilidade em comparação com a mistura controle. A adição do resíduo de granito garante melhor empacotamento da matriz de agregados e cimento, levando a redução no espaço para água livre e maior dispersão de partículas de cimento, resultando em uma melhor condição de hidratação e maior aderência dos componentes do concreto. Com 30% de substituição, a resistência à compressão foi comparável a mistura de controle.

A flexão do concreto também aumenta com o aumento da porcentagem do resíduo de granito. A profundidade de penetração da água da mistura G_{30} também é mínima, indicando maior durabilidade e, portanto, tornando-a menos suscetível ao ataque de ácidos, sulfatos e cloretos em comparação com a mistura controle.

Jain; Sancheti; Gupta, 2020

O trabalho tem como objetivo a substituição parcial da areia por resíduo de granito para a produção de concreto. O desempenho da mistura de concreto foi avaliado em termos de durabilidade e propriedades microestruturais. Para analisar as propriedades do concreto no estado endurecido foi realizado o ensaio de resistência à compressão, para parâmetros de durabilidade foi feito o ensaio de absorção de água, permeabilidade à água, ataque ácido, ataque por sulfato e teste rápido de penetração de cloreto. A microestrutura foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). O ensaio de XRD foi feito para descobrir a

composição química do cimento areia e do resíduo. A Tabela 24 apresenta a composição química do cimento e do resíduo.

Tabela 24 - composição química do cimento, areia e resíduo de granito, (Jain; Sancheti; Gupta, 2020).

Óxidos	**Cimento (%)**	**Areia (%)**	**Resíduo de granito (%)**
CaO	65,2	3,48	1,98
SiO_2	20,9	73,12	70,56
Al_2O_3	4,7	10,92	14,12
Fe_2O_3	2,8	3,56	3,32
MgO	1,3	3,56	0,76
SO_3	2,2	1,32	-
MnO	-	-	0,13
Na_2O	0,31	0,08	3,46
K_2O	0,44	2,26	4,11
TiO_2	-	2,04	0,35
P_2O_5	-	0,36	0,21
H_2O	-	0,09	0,82

Seis misturas de concretos foram preparadas, a primeira foi o concreto de controle sem resíduo de granito, a segunda com substituição de 10% (GrP_{10}) da areia, terceira 20% (GrP_{20}), quarta 30% (GrP_{30}), quinta 40% (GrP_{40}) e sexta 50% (GrP_{50}). A relação água/cimento foi mantida em 0,53, o superplastificante foi mantido em uma dose constante de 2%. A Tabela 25 apresenta os detalhes das misturas preparadas.

Tabela 25 - Detalhes das misturas preparadas (Jain; Sancheti; Gupta, 2020).

Identificação da mistura	**Cimento**	**Areia**	**Resíduo de granito**	**Brita**	**Água**	**Aditivo**
Referência	316,0	721,0	-	717,0	168	6,32
GrP_{10}	316,0	648,9	72,1	717,0	168	6,32
GrP_{20}	316,0	576,8	144,2	717,0	168	6,32
GrP_{30}	316,0	504,7	216,13	717,0	168	6,32
GrP_{40}	316,0	432,6	288,4	717,0	168	6,32
GrP_{50}	316,0	360,5	360,5	717,0	168	6,32

Concluiu-se nesta pesquisa que a permeabilidade das misturas de concreto foi reduzida com o aumento da quantidade de resíduo de granito no concreto. A profundidade de penetração da água para a mistura de controle foi maior em comparação a $GrP_{30.}$ A absorção de água foi reduzida com o aumento do resíduo até $GrP_{30.}$ Isso ocorreu por causa da redução da porosidade e de vazios do concreto misturado com resíduo devido ao efeito enchimento de partículas finas.

O comportamento das misturas de concreto no ataque por ácido e sulfato foi melhor GrP_{20}. O motivo foi a melhor compactação do concreto por partículas mais finas de resíduo em comparação ao cimento e a areia natural.

As análises de Difração de Raio X apresentam que a densidade de empacotamento de uma matriz de concreto é adequada em amostras de 15 a 30%, o que melhora seus resultados em comparação ao concreto de controle.

O resultado de resistência à compressão mostrou que a mistura de GrP_{30} teve o melhor resultado.

Sing *et al.,* 2016

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade de utilizar resíduo de granito como substituto parcial da areia em concretos. O artigo avaliou a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido foram feitos os ensaios de compactação, resistência à compressão, flexão, abrasão, permeabilidade.

Para saber a composição química da areia e resíduo foi feito o ensaio de Espectrometria de Raio X. A Tabela 26 apresenta a composição química dos materiais (SING *et al.* 2016).

Tabela 26 - Composição química dos materiais (Sing *et al.* 2016).

Compostos	**Pasta de granito (%)**	**Areia do rio (%)**
SiO_2	73,19	84,73
CaO	20,14	-
MgO	-	1,33
Perda na ignição LOI	0,53	-
Fe_2O_3	5,93	-
Al_2O_3	-	10,66

As porcentagens de substituição da areia foram de 0% (sem resíduo), 10% (RG_{10}), 15% (RG_{15}), 20% (RG_{20}), 25% (RG_{25}), 30% (RG_{30}), e 40% (RG_{40}). Todas as misturas mantiveram a relação água/cimento de 0,4. A Tabela 27 apresenta as proporções dos materiais das misturas em Kg/m³.

Tabela 27 - Apresenta as proporções dos materiais das misturas (SING *et al.* 2016).

Id. das misturas	**Cimento**	**Areia**	**Resíduo**	**Brita (10 mm)**	**Brita (20 mm)**	**Água**
RG_0	419	643	0	446	669	168
RG_{10}	419	578,7	64,3	446	669	168
RG_{15}	419	546,55	96,45	446	669	168
RG_{20}	419	514,4	128,6	446	669	168
RG_{25}	419	482,25	160,75	446	669	168
RG_{30}	419	450,1	192,9	446	669	168
RG_{40}	419	385,8	257,2	446	669	168

Observou-se que a compactação diminuiu de acordo com o aumento de finos devido ao aumento da demanda de água. Esse declínio de trabalhabilidade pode ser compensado pela adição de superplastificante, esse fator não deve ser um problema importante no uso de resíduo no concreto.

Na resistência à compressão e à flexão foi observada na porcentagem de substituição de 25% areia pelo resíduo de granito.

Todas as substituições obtiveram menor permeabilidade do que o concreto controle, a menor profundidade de penetração foi apresentada na substituição de 30%.

O desempenho do resíduo foi notável e melhor do que a areia natural quando se trata de resistência abrasiva. O percentual ótimo de substituição foi de 40%. Esse concreto pode ser utilizado em locais onde a estrutura de concreto é exposta a alto desgaste, como pavimentos.

Assim pode-se concluir, que a incorporação de resíduo de granito serve como uma solução potencialmente viável para o problema de geração global de resíduos de pedra.

2.10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os artigos acima citam estudos com o uso de resíduos industriais como resíduos de corte de granito e mármore de forma sustentável na construção civil. Os estudos citados indicam que a incorporação de resíduos de granito em concreto pode resultar em melhorias na resistência e durabilidade da argamassa, concreto, microconcreto. O uso desse resíduo não melhora apenas as propriedades do concreto, mas também contribui para a redução do impacto ambiental, já que menos recursos naturais são necessários.

Os estudos supracitados apontam que a substituição ideal de resíduo de granito geralmente e em torno de 25%. Portanto, os estudos demonstram que a utilização sustentável de resíduos de granito na produção de concreto é viável e pode resultar em benefícios significativos em termos de resistência, durabilidade e redução do impacto ambiental. No entanto, é importante considerar as proporções ideais de substituição com base nas características especificas de cada tipo de resíduo. Essas descobertas podem ser aplicadas de forma eficaz na indústria da construção para promover práticas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Todo o programa experimental foi realizado na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), nos laboratórios de Engenharia Civil (LECIV) e no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV). Os ensaios foram feitos para determinar as características químicas, físicas e mecânicas dos materiais que foram utilizados para a fabricação dos CAA.

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos da pesquisa, o programa experimental foi executado para avaliar o desempenho do microconcreto autoadensável utilizado como material de reparo em vigas aos 80 dias de idade. Todos os resultados alcançados na pesquisa permitiram avaliar o comportamento das vigas de concreto com reparo de microconcreto autoadensável. As vigas foram fabricadas com dimensões e armaduras iguais.

A metodologia utilizada para a caracterização dos materiais, para as misturas e moldagens, assim como todos os ensaios mecânicos dos corpos de provas e vigas, foram executadas conforme as orientações normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e *European Federation of National Trade Associations* (EFNARC). A Figura 16 apresenta o organograma do programa experimenta desta pesquisa.

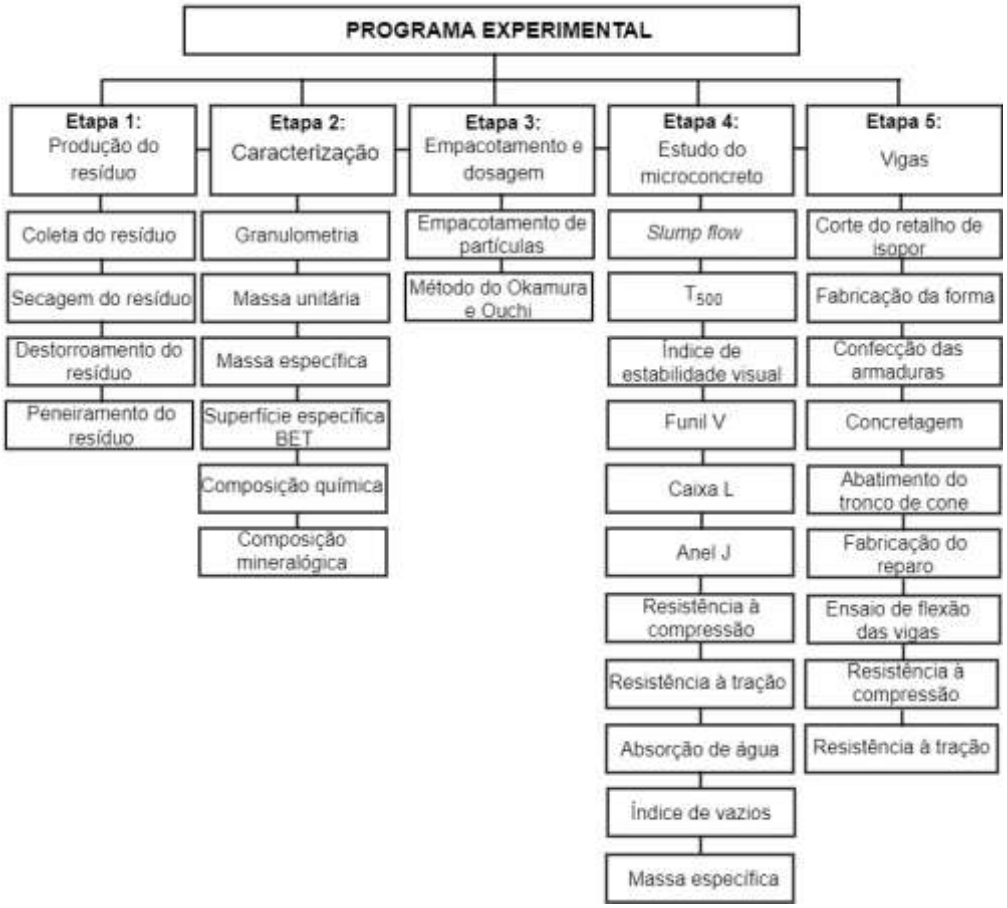


Figura 16 - Organograma do programa experimental.

3.2. MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção do Microconcreto autoadensável (MCAA) foram: cimento, areia, resíduo do corte e beneficiamento do granito, aditivos superplastificante, modificador de viscosidade e água, cujas características são apresentadas nos próximos tópicos.

Cimento

O cimento utilizado na pesquisa é o Cimento Portland – Alta resistência inicial CP-V ARI.

Areia

O agregado miúdo utilizado é a areia natural média quartzosa, proveniente do munícipio de Campos dos Goytacazes/RJ, extraída do Rio Paraíba do Sul. Para análise desse material foram feitos os ensaios de granulometria, massa unitária e massa específica real.

3.2.1. BENEFICIAMENTO DO RESÍDUO DE GRANITO

Para a caracterização física do resíduo foram realizadas as seguintes análises: massa específica real, que se baseia na ABNT NBR NM 16916 2021, superfície específica, que seguiu a norma ABNT NBR 16372/2015, caracterização química, caracterização mineralógica e distribuição do tamanho de partículas através do método de granulometria a laser.

O resíduo foi coletado na cidade de Santo Antônio de Pádua/RJ, na Indústria e Comércio de Pedras Rola LTDA. A Figura 17 apresenta os poços onde foi retirado o resíduo de granito.

Figura 17 - Poços que foi retirado o resíduo de granito.

Logo após o resíduo ser retirado dos poços ele foi colocado em sacos plástico, lacrados com barbante e transportados para Campos dos Goytacazes, onde os sacos foram abertos e o resíduo colocado dentro de uma caixa d'água. Para secar o resíduo ele foi colocado em tabuleiros e em seguida colocado na estufa a 100° C por 48 horas, posteriormente retirado da estufa, ficou 2 horas para arrefecer, em seguida foi destorroado, peneirado na peneira #20 (0,85 mm) e estocado em tonéis pronto para uso. A peneira #20 foi escolhida porque o concreto autoadensável tem uma grande quantidade de finos, essa granulometria contribui para a estabilidade da mistura.

Superplastificante

Nesta pesquisa para ajudar na trabalhabilidade do microconcreto foi utilizado o aditivo superplastificante ELTECH HP 100 doado pela empresa Eltech, pertence a segunda geração, e a sua composição química composta de éster carboxilato e aditivos especiais. A Tabela 28 apresenta algumas especificações informadas pelo fabricante sobre o aditivo.

Tabela 28 - Especificações do Superplastificante utilizado na pesquisa.

Fabricante	**Eltech**
Nome	Superplastificante Eltech HP 100
Composição	Policarboxilato
Densidade	1,05 a 1,08 g/cm³
Coloração	Castanho
Ph	Neutro
Estado	Líquido

Modificador de Viscosidade

Nesta pesquisa também foi utilizado como aditivo modificador de viscosidade o Eltech Pump para melhorar a fluidez do microconcreto, o aditivo também foi doado pela empresa Eltech, e tem como composição química tensoativos orgânicos. A

Tabela 29 abaixo apresenta algumas especificações informadas pelo fabricante sobre o aditivo.

Tabela 29 - Especificações do Modificador de viscosidade utilizado na pesquisa.

Fabricante	**Eltech**
Nome	Modificador de viscosidade Eltech Pump
Composição	Polímeros de alto peso molecular
Coloração	Translucido
Ph	Alcalino
Estado	Líquido

3.3. MÉTODOS DE ENSAIOS

Neste tópico são apresentados os ensaios utilizados para determinação de características físicas da areia, cimento e resíduo, como granulometria, massa unitária, específica, superfície específica composição química, mineralógica e propriedades no estado fresco e endurecido.

3.3.1. ENSAIO DE GRANULOMETRIA DA AREIA

O ensaio de granulometria da areia, foi feito de acordo com a norma NM 248/2001. O ensaio é executado com a seguinte metodologia:

a) Secar as amostras do ensaio na estufa em 105 °C ± 5 °C;

b) retirar as amostras da estufa e esperar esfriar na temperatura ambiente;

c) determinar as massas (m_1 e m_2);

d) tomar a amostra m_1 e reservar a m_2;

e) encaixar as peneiras, previamente limpas, de modo a formar um único conjunto de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo. Prover um fundo de peneiras adequado para o conjunto;

f) colocar a amostra (m_1) ou porções da mesma sobre a peneira superior do conjunto, de modo a evitar a formação de uma camada espessa de material sobre qualquer uma das peneiras;

g) promover a agitação do conjunto de peneiras, por um tempo razoável para permitir a separação e classificação prévia dos diferentes tamanhos de grão da amostra;

h) destacar e agitar manualmente a peneira superior do conjunto (com tampa e fundo falso encaixados) até que, após um minuto de agitação contínuo, a massa de material passante pela peneira seja inferior a 1% da massa do material retido.

i) remover o material retido na peneira para uma bandeja identificada. Escovar a tela em ambos os lados para limpar a peneira;

j) proceder à verificação da próxima peneira, depois acrescentar o material passante na peneira superior, até que todas as peneiras do conjunto tenham sido verificadas;

k) determinar a massa total de material retido em cada uma das peneiras e no fundo do conjunto;

l) proceder ao peneiramento da segunda amostra, de massa $m_{2.}$

m) calcular as porcentagens médias, retida e acumulada, em cada peneira, com aproximação de 1%;

n) determinar o módulo de finura, com aproximação de 0,01.

A Figura 18 apresenta as peneiras que foram utilizadas para fazer o ensaio.

Figura 18 - Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria.

O mesmo procedimento foi feito no ensaio de granulometria do agregado graúdo, porém com peneiras de abertura diferentes.

3.3.2. ENSAIO DE MASSA UNITÁRIA DA AREIA.

Antes de executar o ensaio a areia foi colocada em estufa a 105 °C ± 5 °C, o ensaio foi executado de acordo com a norma NM 45/2006. Determinar a massa do recipiente vazio;

a) efetuar o adensamento da camada de agregado mediante 25 golpes da haste de adensamento, distribuídos uniformemente em toda a superfície do material;

b) continuar o enchimento do recipiente até completar dois terços de sua capacidade e efetuar mais 25 golpes de forma uniforme;

c) terminar de encher totalmente o recipiente e efetuar mais 25 golpes, nivelar a camada superficial do agregado com as mãos ou utilizando uma espátula, de forma a rasá-la com a borda superior do recipiente;

d) determinar e registrar a massa do recipiente mais seu conteúdo.

A Figura 19 apresenta o ensaio unitário sendo feito.

Figura 19 - Ensaio de massa unitária.

3.3.3. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA - MÉTODO DO PICNÔMETRO

O ensaio de determinação de massa específica do agregado miúdo, foi baseado na norma de solos de acordo com a NBR 6508/84.

a) coloca-se a areia em uma cápsula com água destilada em quantidade suficiente para se obter pasta fluida;

b) logo após dispersa a pasta em aparelho adequado para o dispersor referido neste método, o tempo de dispersão será de cerca de 15 minutos;

c) em seguida a amostra é transferida para o picnômetro e se junta a água destilada até aproximadamente metade de seu volume;

d) faz-se vácuo de 15 minutos no picnômetro para extrair o ar contido na amostra;

e) para verificar se o ar aderente às partículas foi removido na operação anterior, adiciona-se água destilada até atingir a base do gargalo e faz-se vácuo novamente, se o ar for realmente removido o nível d'água, permanecerá constante ainda que apareçam bolhas na sua superfície, se houver variação d'água será necessário preparar uma nova amostra e repetir as operações anteriores. A

presença de matéria orgânica em alguns casos, a remoção do ar aderente as partículas podem se tornar um processo mais energético que o vácuo. Deve-se colocar o picnômetro em banho maria, durante 30 minutos, no mínimo, adicionando-se água destilada para compensar a evaporação;

f) logo após deixe-se o picnômetro em repouso, até que a temperatura do conteúdo se equilibre com a do ambiente;

g) enche-se o picnômetro com água destilada até próximo da marca de calibração e prossegue-se adicionando água destilada até que a base do menisco coincida com a referida marca;

h) enxuga-se a parte externa do picnômetro e a parte interna do gargalo acima do menisco;

i) pesa-se o conjunto picnômetro + solo + água, com resolução de 0,1 g;

j) determina-se, logo a seguir, com a resolução 0,1 °C, a temperatura T do conteúdo do picnômetro. Com esse valor, obter na curva de calibração correspondente, com resolução, de 0,1 g, a massa do picnômetro cheia de água até marca de referência.

3.3.4. ENSAIO DE GRANULOMETRIA DO RESÍDUO E DO CIMENTO

A granulometria do resíduo fez-se no granulômetro a laser Mastersizer 3000 (Malvern), o dispersante utilizado foi a água deionizada, o tempo de dispersão foi de 15 minutos. A Figura 20 apresenta o ensaio de granulometria a laser.

Figura 20 - Ensaio de granulometria a laser.

3.3.5. MODELO DE BRUNEAUER EMMETT E TELLER (BET)

O modelo de BET é um procedimento utilizado para determinação da superfície específica dos materiais sólidos. O ensaio foi feito no equipamento da marca Quantachrome, modelo AUTOSORB -1C, o pré-tratamento das amostras foi em aquecimento sob vácuo 200 °C / 4h, fissorção foi de nitrogênio. Este teste foi feito no cimento e no resíduo de rocha ornamental. A Figura 21 apresenta o equipamento utilizado para fazer o teste.

Figura 21 - Equipamento usado no ensaio de de BET.

3.3.6. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

O ensaio foi realizado no resíduo de rocha ornamental, o método utilizado foi o qualiquante, ou seja, qualificou e quantificou os elementos (óxidos) contidos na amostra. O equipamento utilizado no ensaio foi o Shimadezu EDX – 720 com tubo de 3 Kw e alvo de ródio. A Figura 22 apresenta o ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X sendo executado.

Figura 22 - Ensaio de Espectrometria de Raio X sendo executado.

3.3.7. ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO X (DRX)

A caracterização mineralógica do resíduo foi realizada por análise de difração de raios X (DRX). O equipamento utilizado foi o difratômetro Miniflex 600 (Rigaku) com uma linha de radiação Cu-Kα a 15 m A e 40 kV foi usado para Coleta de dados DRX, obtendo medições em uma faixa angular de 10°–70°, com um tamanho de passo de 0,02°, e a uma velocidade de leitura de 10°/min. A Figura 23 apresenta o ensaio sendo executado.

Figura 23 – Ensaio de Difração de Raio X (DRX).

3.4. METÓDO DE DOSAGEM

3.4.1. CURVA DE ANDREASSEN MODIFICADA (ALFRED)

A Curva de Andreasen Modificada (também conhecida como Curva de Alfred) não constitui um ensaio propriamente dito, mas sim uma representação teórica empregada na análise da distribuição e tamanho das partículas, com o intuito de identificar a distribuição ideal para alcançar o máximo empacotamento.

O coeficiente de distribuição utilizado na pesquisa, representado por q, é crucial para alcançar níveis ideais de fluidez e densificação em uma mistura. É recomendável que este coeficiente esteja situado na faixa de 0,20 a 0,30. Valores próximos a 0,20 são preferíveis, pois promovem misturas mais maleáveis, especialmente ao aumentar a proporção de finos. Isso reduz a interferência dos

grãos maiores, permitindo que apenas a força da matriz se manifeste no sistema. Pela EFNARC, é recomendável que o coeficiente de distribuição permaneça entre 0,20 e 0,23. Assim, o valor de 0,20 foi estabelecido como o ideal para garantir a máxima fluidez da mistura (EFNARC 2005). A Figura 24 apresenta a curva de Alfred.

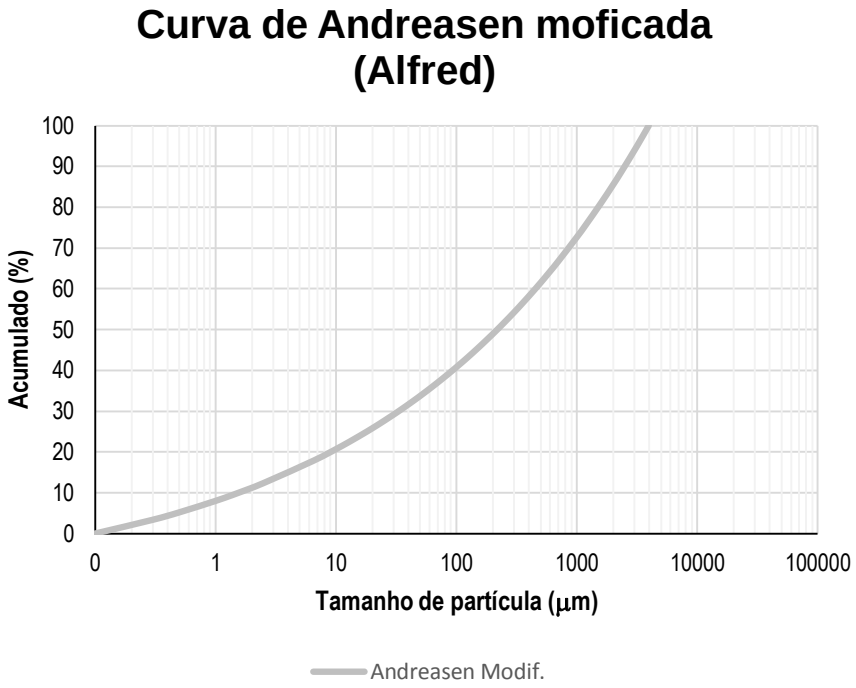


Figura 24 – Curva de Andreasen modificada (Alfred).

Neste tópico são apresentados os ensaios do microconcreto autoadensável executados no estado fresco, eles foram executados para analisar a reologia do microconcreto autoadensável, foram analisadas a fluidez, viscosidade e resistência a segregação.

3.4.2. MINI SLUMP

Este ensaio foi utilizado para determinar parâmetros, a partir dele é feito a correção de dosagem dos materiais. O cone utilizado na pesquisa tem o diâmetro de maior de 12 cm e a altura de 7,20 cm. As Figuras 25 e 26 apresentam o procedimento do ensaio do mini slump.

Neste ensaio o microconcreto tem que se deformar pela ação do seu próprio peso, o ensaio consiste na medição do diâmetro do microconcreto em duas

dimensões perpendiculares entre si. Logo após a medição, soma-se as duas dimensões e divide-se por dois, para fazer a média entre elas. Posteriormente fez-se o cálculo do Gm como mostra a equação 5.

$$Gm= (\frac{D_m}{D_0})^2 - 1 \quad (5)$$

Figura 25 - Cone utilizado para fazer o Mini slump.

Figura 26 - Ensaio do Mini slump executado.

3.5. ENSAIOSDO MICROCONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO FRESCO

Os ensaios frescos foram executados para descobrir as características reológicas das composições.

3.5.1. ENSAIO DE ESPALHAMENTO (*SLUMP FLOW TEST*)

Esse ensaio é um ensaio de espalhamento que consiste em descobrir se o concreto submetido a uma determinada força do seu próprio peso consegue-se espalhar até atingir uma dimensão determinada em um tempo limite determinado.

Os principais equipamentos utilizados no ensaio são: o cone de Abrans de acordo com ABNT NBR 15823-1/2010, chapa de aço de 90 cm x 90 cm com espessura de 2 mm, com um círculo demarcado de 50 cm para a medição do tempo que o concreto leva para atingir esse diâmetro e cronômetro com precisão de 0,1 seg.

A seguinte sequência apresenta a execução do ensaio de espalhamento:

a) Coloca-se uma chapa metálica em uma superfície horizontal nivelada;

b) a chapa foi umedecida;

c) o cone foi enchido com concreto;

d) o cone foi levantado e simultaneamente foi acionado o cronômetro, o tempo foi medido o em segundos em que o concreto alcança do diâmetro de 500 mm (T_{50}).

e) O resultado do ensaio é o espalhamento do *Slump Flow* da massa do concreto é obtida pela média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro.

A Figura 27 apresenta os equipamentos do ensaio.

Figura 27 - Ensaio Slump Flow Test.

3.5.2. FUNIL V (*V FUNNEL)*

Esse ensaio determina a viscosidade do concreto autoadensável, pela medida do tempo de escoamento de uma massa de concreto através do Funil V. A sequência abaixo apresenta o ensaio de espalhamento de acordo com a ABNT 125823-5/2010.

a) a parte interna do funil foi umedecido;

b) o equipamento foi apoiado em um local plano e horizontal;

c) o Funil V foi preenchido totalmente de forma uniforme, sem adensamento e interrupção em um tempo inferior a 5 minutos após a sua coleta;

d) o excesso de concreto da superfície do Funil V foi retirado com o auxílio de uma colher de pedreiro;

e) foi posicionado um carrinho de mão metálico abaixo do Funil V para a coleta do concreto;

f) a abertura da comporta foi efetuada após o final do seu preenchimento. O cronômetro foi acionado simultaneamente a abertura da comporta e parar quando todo o concreto for escoado. O intervalo de tempo para o escoamento foi registrado.

A Figura 28 mostra o ensaio do Funil V.

Figura 28 - Ensaio do Funil V.

3.5.3. ANEL J (*J RING*)

Este ensaio estabelece o método para a determinação da habilidade passante do concreto autoadensável com obstrução sem segregar. A Figura 29 apresenta o equipamento do Anel J, sendo a sequência do ensaio de espalhamento do Anel J apresentada abaixo acordo com a ABNT 15823-3/2010.

a) foi umedecido o anel J, a placa metálica e cone de Abrans;

b) a placa da base foi apoiada em um local horizontal e nivelada;

c) o Anel J foi posicionado sobre a placa da base, centrando-a com relação às marcas de referência;

d) o cone de Abrans foi preenchido de forma contínua e uniforme com a amostra de concreto;

e) o excesso de concreto na superfície do molde, foi removido com o auxílio da colher de pedreiro. Após foi feito a limpeza da placa da base, retirando todos os resíduos de concreto da superfície;

f) foi efetuada a desmoldagem levantando cuidadosamente o molde pelas alças, na direção vertical, com velocidade constante e uniforme, sem submeter o concreto a movimentos de torção lateral;

g) logo em seguida aguardou-se o concreto alcançar a situação de repouso e em seguida foi realizado as duas medidas perpendiculares do diâmetro de espalhamento do concreto;

h) observou-se visualmente se houve em alguma das barras do equipamento segregação do concreto;

i) em seguida foi feito o cálculo de subtração do valor obtido no ensaio de espalhamento (*Slump Flow Test*) pelo resultado do Anel J.

Figura 29 - Ensaio do Anel J.

3.5.4. ENSAIO CAIXA L (*L BOX*)

Este ensaio é feito para a determinação da habilidade passante em fluxo confinado do concreto autoadensável. A Figura 30 apresenta o equipamento da Caixa L, e a sequência abaixo apresenta o ensaio da Caixa L em conformidade com ABNT 125823-4/2010.

a) a superfície interna da Caixa L foi umedecida com água;

b) a comporta foi fechada e a Caixa L foi colocada em uma superfície plana;

c) logo após o concreto foi colocado na câmara vertical da caixa L foi preenchida totalmente de forma uniforme e sem adensamento;

d) o excesso de concreto foi retirado com o auxílio de uma colher de pedreiro da superfície do equipamento;

e) após o final do preenchimento da câmara vertical, deve foi efetuada a abertura da comporta de forma rápida, uniforme e sem interrupção, permitindo o escoamento do concreto para a câmara horizontal;

f) cessado o escoamento foi medida as alturas H_1 e H_2 e calculado a habilidade passante (HP), logo após fazer a divisão H_2 (câmara vertical) dividido por H_1 (câmara horizontal).

Figura 30 - Ensaio da Caixa L.

3.6. ENSAIOS DO MICROCONCRETO AUTOADENSÁVEL NO ESTADO ENDURECIDO

Neste tópico são apresentados os ensaios realizados no estado endurecido, a resistência à compressão e à tração indireta.

3.6.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Foi utilizado um corpo de prova cilíndrico 5 cm x 10 cm para a determinação das propriedades mecânicas do concreto, como: resistência à compressão e à tração, seguindo as orientações estabelecidas nas normas brasileiras: NBR 5739/2018, NBR 7222/2010, respectivamente.

Para a determinação da resistência à compressão e à tração foram feitos os ensaios na prensa Instron com a capacidade máxima de 100 kN.

Os corpos de prova, após a moldagem, permaneceram 24 horas dentro do molde, sendo posteriormente retirados e colocados em tanques d’água, e retirados na idade de rompimento.

Depois foram faceados utilizando a máquina da marca Pavitest, logo após foi feito o ensaio de resistência à compressão. A Figura 31 apresenta a máquina de retífica.

Figura 31 - Máquina de Retifica.

Em seguida eles passam por um processo de secagem ao ar livre, durante um período de aproximadamente de meia hora. Logo após a secagem os corpos de prova são levados para a prensa, são centralizados no prato da máquina e em seguida é carregada uma carga com uma velocidade constante até a ruptura. A prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão e à tração foi a da marca INSTRON, modelo 34FM -100-AS, capacidade para 100 kN.

A Figura 32 mostra a prensa em que foi feito os ensaios de resistência à compressão e tração.

Figura 32 - Prensa utilizada nos ensaios de resistência à compressão e tração.

Através da força em kN que foi gerada pela máquina foi feito o cálculo para determinar a resistência em MPa. A Equação 6 apresenta o cálculo que foi realizado para a determinação da resistência à compressão.

$$f_c = \frac{4F}{\pi x D^2} \quad (6)$$

onde,

f_c = é a resistência à compressão, expressa em Megapascals (MPa);

F = é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

D = é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

3.6.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de resistência à tração foi por compressão diametral, conhecido internacionalmente como “Brazilian test”, também realizada na prensa Instron. Neste ensaio não houve a necessidade de fazer o faceamento dos corpos de prova pois os mesmos foram solicitados diametralmente e não axialmente. O ensaio foi feito da seguinte forma: antes de começar o ensaio foi colado palitos de picolé com fita crepe no centro das laterais dos corpos de prova, em seguida eles foram colocados

centralizados na prensa Instron, em cima do corpo de prova foi colocado uma chapa metálica para fazer o ensaio que logo após foi executado.

Os procedimentos de moldagem e desmoldagem, cura para a determinação do ensaio de tração por compressão diametral foi o mesmo do ensaio de resistência à compressão. A Figura 33 apresenta o ensaio de tração por compressão diametral.

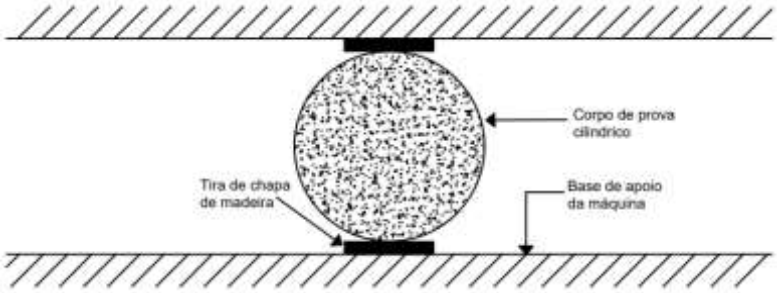


Figura 33 - Disposição do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a NBR 7222 (ABNT 2011).

Através da força em kN que foi gerada pela máquina foi feito o cálculo para descobrir a resistência em MPa. A equação 7 apresenta o cálculo que foi realizado para descobrir o $f_{ct,sp}$.

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (7)$$

onde,

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = carga de ruptura (N);

d = diâmetro do corpo de prova em (mm);

l = comprimento do corpo de prova (mm).

3.6.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

O ensaio de absorção de água foi feito seguindo a norma ABNT NBR 9778/ 2009, no ensaio foram utilizados três corpos de prova de cada composição, com dimensões de 5 cm x 10 cm o ensaio foi feito da seguinte forma:

a) Os corpos de prova foram pesados;

b) logo após foram colocados por setenta e duas horas dentro da estufa em temperatura de (100 ± 5) °C em seguida foram pesados para registrar a massa da amostra (m_s);

c) as amostras foram imergidas em água com a temperatura de (23 ± 2) °C mantidas durante setenta e duas horas nessa condição;

d) Logo após os corpos de prova foram colocados em um recipiente cheio de água que foi levado em ebulição durante o período de cinco horas, mantendo constante o volume de água;

e) Em seguida foi deixado os corpos de prova esfriar normalmente até chegarem à temperatura de (23 ± 2) °C;

f) com uma balança hidrostática os corpos de prova foram pesados para descobrir o peso da amostra saturada imersa em água após a fervura (m_i);

g) Logo após a amostra foi retirada da água e enxugada com um pano úmido e depois foi determinado a massa saturada ($m_{sat.}$);

h) Logo após o ensaio feito, foram feitos os cálculos;

i) O primeiro cálculo feito foi o de absorção, apresentado na Equação 8.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} 100 \quad (8)$$

onde,

m_{sat} = Massa da amostra saturada em água após imersão e fervura.

m_s = Massa da amostra seca na estufa.

O segundo cálculo feito foi o de índice de vazios apresentado na equação 9.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} 100 \quad (9)$$

onde,

I_v = Índice de vazios;

m_i = Massa saturada imersa após a fervura.

O último cálculo foi de massa específica real dos corpos de prova, apresentado na Equação 10.

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} 100 \quad (10)$$

As Figuras 34 e 35 apresentam algumas fases dos ensaios citadas acima

Figura 34 - Corpos de prova dentro da estufa depois de setenta e duas horas.

Figura 35 - Corpos de prova dentro da panela antes do período de fervura.

3.7. DIMENSIONAMENTO DAS VIGAS

A viga é um elemento estrutural em que o comprimento longitudinal é maior que a seção transversal (ABNT NBR 6118, 2023). Neste item detalha-se o dimensionamento das vigas ensaiadas neste trabalho, assim como as armaduras longitudinais e transversais nela utilizada. As vigas foram confeccionadas de forma prismática com seção quadrada com largura e altura de 100 mm e 650 mm. O ensaio feito na viga simplesmente apoiada foi de flexão em quatro pontos.

Na viga é inserido um reparo de 350 mm de largura e 30 mm de altura. A Figura 36 apresenta o esquema da viga sem armadura com apoios, cargas concentradas e o desenho do reforço inserido.

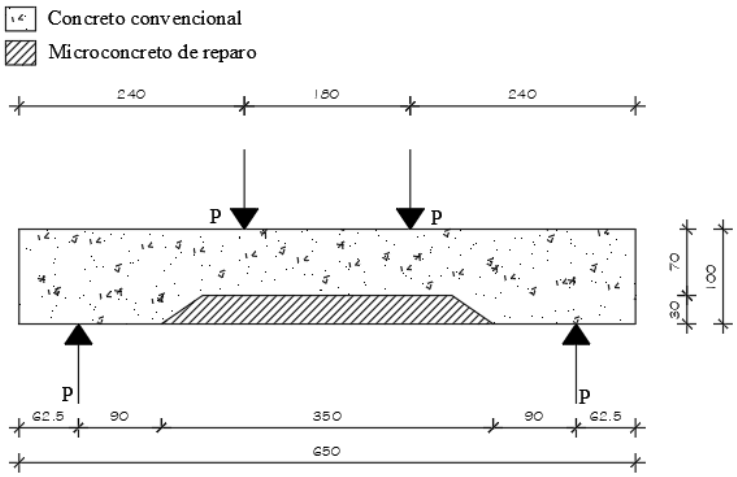


Figura 36 - Viga com apoios, cargas concentradas e o reparo (França, et al., 2018), com modificações da autora.

Os diagramas de esforço cortante e de momento fletor são mostrados na Figura 37.

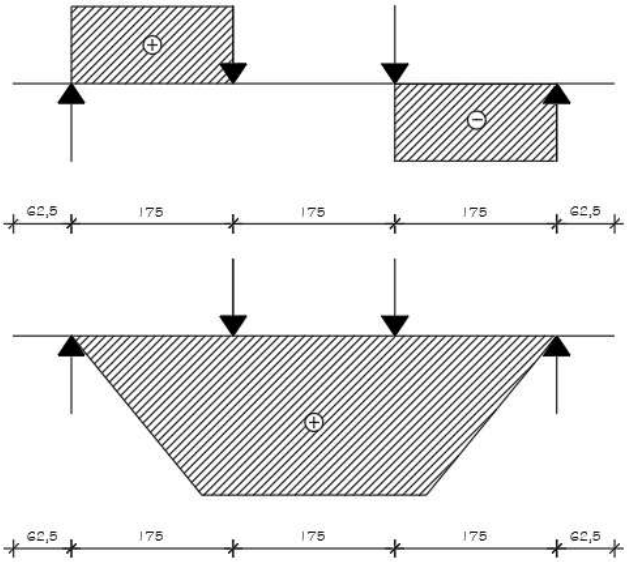


Figura 37 - Viga com apoios, cargas concentradas e o reparo, (França, et al. 2018), com modificações da autora.

Após o dimensionamento da viga foi feito o cálculo da armadura longitudinal e da armadura transversal para que o corpo de prova tivesse ruptura à flexão de acordo com a norma ABNT NBR 12142 (2010). O objetivo de romper a viga na flexão é avaliar a aderência das argamassas de reparo no substrato.

A Figura 38 apresenta a seção transversal de uma viga sob flexão simples, de forma retangular, com o momento fletor positivo, a viga possui a largura b_w, altura h, armadura A_s e A'_s no concreto comprimindo, delimitada pela linha neutra (LN). A linha neutra é marcada pela distância x, contada a partir da fibra mais comprimida da seção transversal. A altura útil é d, considerada da fibra mais comprimida até o centro da gravidade da armadura longitudinal tracionada.

O diagrama de deformação ao longo da altura de seção, com as deformações ε_{cd} (máxima deformação do encurtamento do concreto comprimido) e ε_{sd} (Deformação de alongamento da armadura tracionada), o diagrama retangular simplificado de distribuição de tensões de compressão com altura y = 0,8x, e as respectivas resultantes de tensão ($_{Rcc}$ e R_{st}).

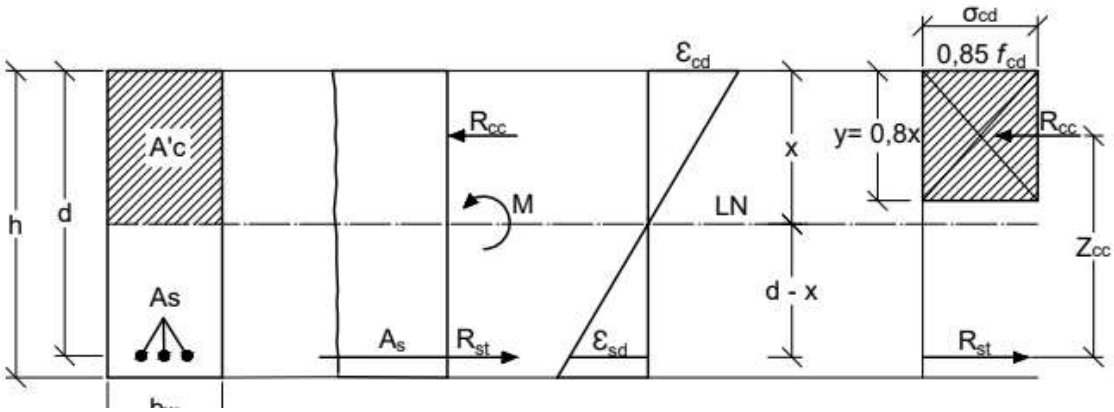


Figura 38 - Distribuição de tensões e deformações em viga de seção retangular com armadura simples.

Para saber o quanto a viga pode suportar no ensaio de flexão simples são feitos alguns cálculos.

Primeiro faz-se o cálculo de equilíbrio das forças normais, apresentado nas equações 11, 12, 13 e 14.

$$\sum N = 0 \tag{11}$$

onde,

∑N = Somatório de força normal.

$$R_{cc} = R_{st} \tag{12}$$

onde,

R_{cc} = Resultante das tensões de deformação;

R_{st} = Resultante das tensões da armadura.

$$R_{cc} = 0{,}68 b_w x f_{cd} \tag{13}$$

onde,

b_w = largura da seção;

X = Posição da linha neutra;

f_{cd} = cálculo de resistência à compressão do concreto.

$$R_{st} = \sigma_{sd} A_s \tag{14}$$

onde,

σ_{sd} = tensão de cálculo na armadura tracionada;

A_s = área de aço da armadura tracionada.

Logo após é feito o cálculo de Equilíbrio do Momento Fletor que está apresentada na Equação 15.

$$M_d = 0{,}68 b_w \text{ x } f_{cd} (d\text{-}0{,}4) \quad (15)$$

onde,

b_w = largura da seção;

x = posição da linha neutra;

f_{cd} = resistência de cálculo do concreto à compressão;

d = altura útil.

3.7.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

O cálculo de resistência à tração na flexão foi calculado por meio da Equação 16.

$$f_{ct,f} = \frac{F.l}{b.d^2} \quad (16)$$

onde,

fct,f = resistência à tração na flexão, no presente estudo é a resistência; daderência à tração na flexão, em MPa (Megapascals);

F = força máxima registrada na máquina durante o ensaio, em N (Newtons);

l = dimensão do vão livre entre apoios, expressa em mm;

b = largura média do corpo de prova, expressa em mm;

d = altura média do corpo de prova, expressa em mm.

3.7.2. ARMADURA DA VIGA

Para a pesquisa foi adotado o tipo de aço nervurado, foram utilizados CA-60 com o diâmetro de 4,2 mm em cima e CA-50 com 8,0 mm de diâmetro embaixo. O microconcreto que foi utilizado para ser inserido o reparo foi para 30 MPa. A Figura 39 apresenta a representação dos aços com as medidas utilizados nas vigas.

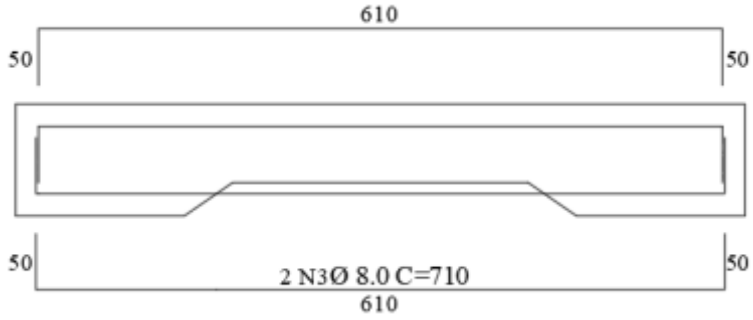


Figura 39 - Aços com as medidas utilizados nas vigas.

Os estribos utilizados na pesquisa têm o tamanho 60 mm x 60 mm o aço utilizado foi o CA-60 com o diâmetro de 4,2 mm. As Figuras 40 a) apresentam o estribo com as medidas e b) estribo inserido dentro da viga.

a) b)

Figura 40 – Estribo com as medidas utilizados nas vigas, (França, et al. 2018), com modificações da autora.

A Figura 41 apresenta a viga com as armaduras em imagem 3D, modelada no programa Sketchup para melhor visualização.

.

Figura 41 - Viga em 3D com as armaduras.

As tabelas 30 e 31 apresentam tipos de aço e comprimento utilizados nas armaduras e dimensões, detalhes das armaduras respectivamente.

Tabela 30 - Tipos e comprimento dos aços utilizados na viga.

Aço	N°	Ø (mm)	Comprimento em (mm)
CA -60	1	4,2	710
	2	4,2	320
CA-50	3	8	710

Tabela 31 - Detalhes da armadura utilizada embaixo da viga.

Vigas	bw (mm)	h (mm)	d (mm)	d' (mm)	As (mm)	S (mm)	ρ (%)	Asw (mm²)	Psw (%)
Armadura CA-50	100,0	100,0	80,0	20,0	62,34	50,0	0,8	27,71	0,55

b_w = Largura da seção transversal da viga;

h = Altura da viga;

d = Altura efetiva da viga;

d':= Cobrimento estrutural da viga;

A_s:= Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração;

S: = Espaçamento entre os estribos (centro a centro);

P:= Taxa geométrica de armadura longitudinal de tração;

A_{sw}: = Área da seção transversal da armadura transversal;

ρ_{sw}:=Taxa geométrica de armadura transversal.

3.7.3. FÔRMAS

Para a fabricação das fôrmas, foi utilizada a madeira de compensado naval, ela possui 12 compartimentos que foi definido de acordo com as substituições de resíduo por rocha ornamental. Primeiro foi feito o desenho das vigas com todas as dimensões da fôrma no programa Autocad da empresa Autodesk, posteriormente, a fôrma foi produzida. As Figuras 42 e 43 apresentam o desenho da forma das vigas com as medidas e a fôrma de madeira pronta respectivamente.

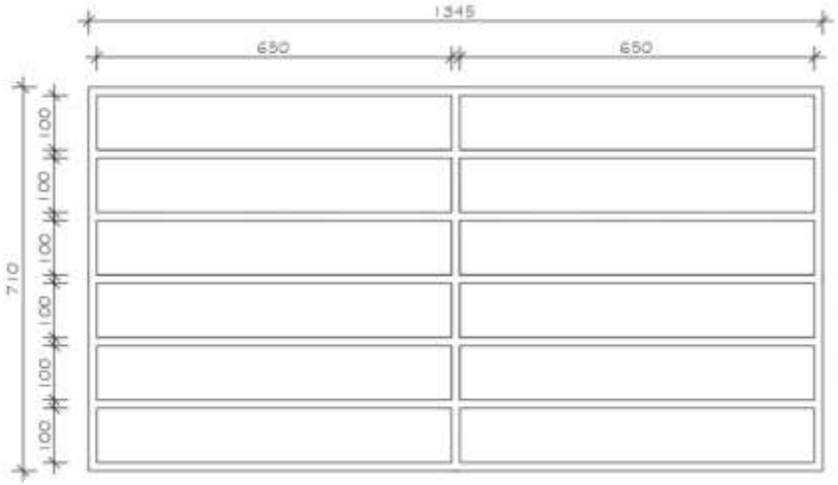


Figura 42 - Desenho da fôrma das vigas.

Figura 43 - Fôrma construída para a fabricação das vigas.

Logo após a fôrma pronta, foi cortado o isopor em forma trapezoidal no tamanho de 175 mm x 30 mm para o entalhe da viga que receberem o reparo. A Figura 44 apresenta a fôrma das vigas com o isopor.

Figura 44 - Fôrma das vigas com entalhe de isopor.

Após a colocação do isopor nas fôrmas das vigas, foi colocado as armaduras das vigas. A Figura 45 apresenta a fôrma das vigas com as ferragens.

Figura 45 - Fôrma das vigas com as ferragens.

Seguidamente a fôrma foi colocada na mesa vibratória, em seguida recebeu o concreto. A Figura 46 apresenta a fôrma preenchida de concreto.

Figura 46 - Fôrma de concreto preenchida com concreto.

Em Toda a forma foi colocado desmoldante para facilitar a desmoldagem das vigas. Foi concretado junto com as vigas, 6 corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm para determinar a resistência à compressão e à tração. A Figura 47 mostra as vigas e os corpos de prova desmoldados, seguidamente foram colocadas em uma caixa d'água com hidróxido de cálcio.

Figura 47 - Vigas e corpos de prova desmoldados.

3.8. FABRICAÇÃO DO CONCRETO UTILIZADO NAS VIGAS

A mistura do concreto foi feita em uma betoneira com capacidade máxima de 80 litros previamente umedecida. Segue abaixo a descrição das etapas da produção do concreto. A Figura 48 apresenta a confecção do concreto.

a) Mistura por um minuto o cimento, brita;

b) Mistura e a metade água e todo o superplastificante (Gleniun 51);

c) Mistura por cinco minutos adiciona a areia e a outra metade da água;

d) Parou a betoneira por um minuto para retirar o excesso da mistura aderida nas paredes da betoneira;

e) Misturou por mais quatro minutos.

Figura 48 - Confecção do concreto.

A Tabela 32 apresenta a composição do concreto que foi utilizado.

Tabela 32 - Traço do concreto convencional para a viga.

Materiais	**Quantidade (Kg)**
Cimento	31,63
Areia	71,15
Brita	102,79
Água	19,86
Superplastificante	0,24 %

Logo após a retirada do concreto da betoneira, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone para avaliar a sua consistência, o ensaio foi feito de acordo com a norma ABNT NBR 16889/2020, atingindo o valor de 170 mm, em seguida foi feito o preenchimento da fôrma das vigas e dos corpos de prova. Os corpos de prova utilizados têm a dimensão de 10 cm x 20 cm.

Após 24 horas de moldagem, os corpos de prova de concreto foram retirados das fôrmas e colocados em tanques d'água para a cura úmida até a idade de ruptura.

Após 16 dias as vigas em cura imersa, foram retiradas da água, ficando 2 horas secando em temperatura ambiente e logo após foi realizada a retirada do isopor para receber o reparo. A Figura 49 apresenta as vigas sem o entalhe de isopor.

/

Figura 49 - Vigas sem o entalhe de isopor.

3.9. FABRICAÇÃO DO REPARO NAS VIGAS

O microconcreto de reparo foi feito na argamassadeira, cada viga teve o seu reparo feito separadamente. Segue abaixo a descrição das etapas da produção do microconcreto.

a) Foi misturada a água com o superplastificante e modificador de viscosidade e cimento por 30 segundos em velocidade baixa;

b) sem parar a argamassadeira foi adicionado a areia e resíduo em 30 segundos, após os 30 segundos aumentou a velocidade e deixou misturar por 30 segundos;

c) em seguida desligou-se a argamassadeira durante 30 segundos e retirado o excesso de microconcreto nas laterais do recipiente e deixado repousar por um minuto;

d) logo após ligada a argamassadeira em velocidade alta durante um minuto;

e) em seguida desligou-se a a argamassadeira e adicionado o microconcreto nas vigas.

3.10. ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS

O ensaio de flexão a quatro pontos das vigas foi feito na prensa da marca SHIMADZU, UH - F a máquina tem o limite de carga de 500 kN. A Figura 50 mostra a prensa UH – F utilizada no ensaio.

Figura 50 - Máquina da prensa.

Na Figura 51 mostra-se o ensaio das vigas à flexão a quatro pontos.

Figura 51 - Máquina da prensa executando o ensaio de flexão nas vigas.

3.11. ANÁLISE ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados dos testes de resistência à compressão e tração foram tratados estatisticamente com a média, DP (desvio padrão), CV (Coeficiente de variação) e Deliamento Inteiramente Casualizado (DIC), Para comparar os diferentes resultados e identificar se houve significativa entre eles, foi utilizado a Análise de Variância (ANOVA), com o nível de 5% de probabilidade ($p<0,5$). Logo após os testes de médias foram feitas pelo método de Tukey a fim de verificar quais os resultados deferiram entre si. Os resultados das análises estáticas estão apresentados no Anexo 1 e Anexo 2.

4. RESULTADOS

Esse capítulo apresenta todos os resultados dos ensaios de caracterização, no estado fresco e endurecido do programa experimental.

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

4.1.1. GRANULOMETRIA DO AGREGADO MIÚDO

O módulo de finura e o diâmetro máximo da areia foi de 2,39 e Ø2,40 respectivamente.

A Figura 52 mostra as curvas de distribuição granulométrica da areia, cimento e resíduo. Nota-se que a granulometria da areia é maior é a menor é a do cimento.

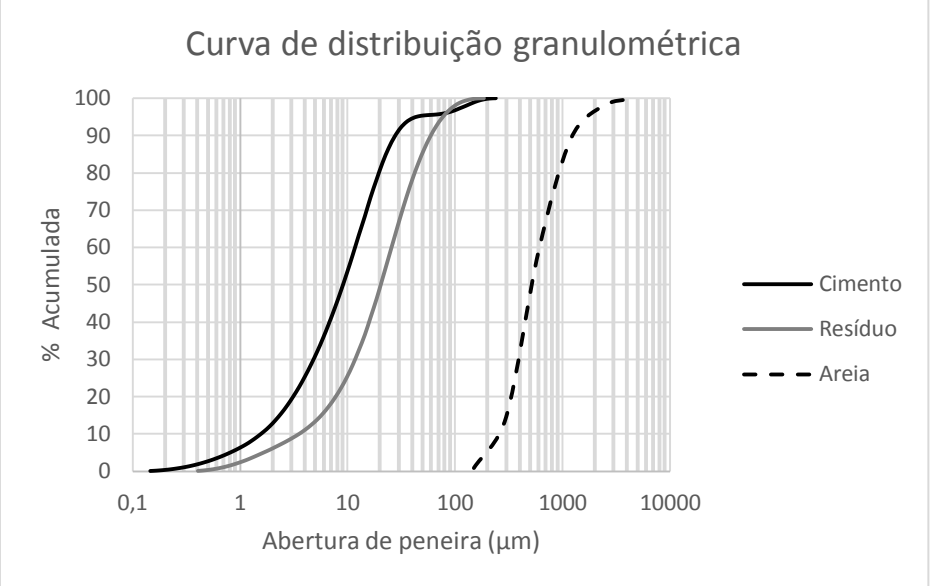


Figura 52 - Curva granulométrica de distribuição do cimento, resíduo e areia.

4.1.2. GRANULOMETRIA DO AGREGADO GRAÚDO

Foi feito o ensaio de granulometria do agregado graúdo para a concretagem das vigas. Pode se observar que a granulometria do agregado graúdo se manteve contínua. A Figura 53 apresenta a curva granulométrica do agregado graúdo utilizado na fabricação das vigas.

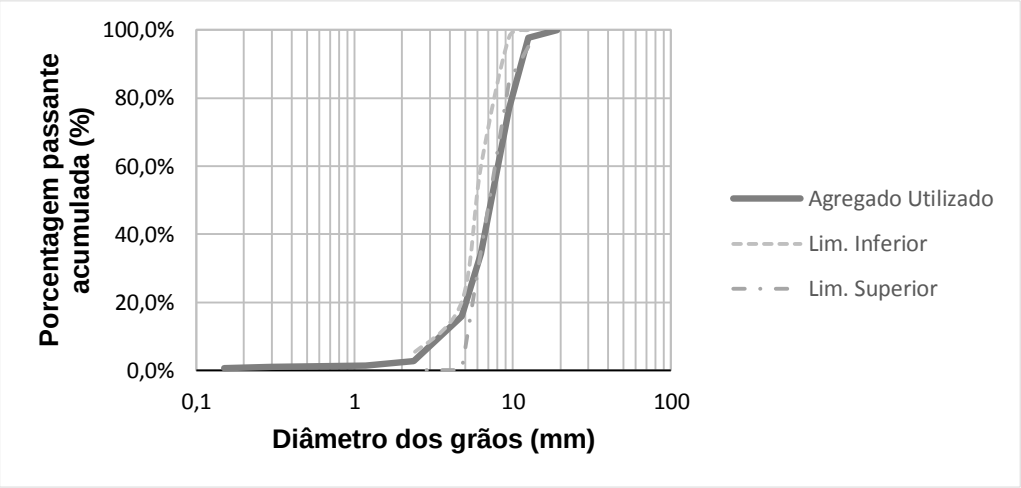


Figura 53 - Curva granulométrica do agregado graúdo das vigas.

4.1.3. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA E MASSA UNITÁRIA

Quanto maior a massa específica do material, mais densa é a substância, pode-se observar que o resíduo tem a densidade maior que a areia. A massa unitária da areia foi de 1,32 g/cm³, isso quer dizer que a cada centímetro cúbico de areia tem uma massa de 1,32 gramas.

A Tabela 33 apresenta a massa específica real e unitária da areia e do resíduo de rocha ornamental.

Tabela 33 - Massa específica real e massa unitária do agregado miúdo e do resíduo de rocha ornamental.

Materiais	Massa específica (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)
Agregado miúdo	2,66	1,32
Resíduo de rocha ornamental	2,70	-

Observa-se que o agregado miúdo e o resíduo de rocha ornamental têm a massa específica próxima. O ensaio teve um resultado positivo para a pesquisa, pois quanto maior a densidade menor é a sua porosidade.

4.1.4. ENSAIO DE BET

O ensaio de superfície específica foi feito no cimento e no resíduo de rocha ornamental, quanto maior a superfície específica do material mais fino ou fragmentado é a textura do material. Observa-se que o cimento é mais fino que o resíduo de rocha ornamental. A Tabela 34 apresenta os resultados do ensaio de BET.

Tabela 34 - Resultado do ensaio de BET.

Materiais	Superfície específica (g/m²)
Cimento	2,70
Resíduo de rocha ornamental	2,64

4.1.5. ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIO X (FRX)

O quartzo, que geralmente constitui a maior parte do granito, é um mineral composto principalmente por dióxido de silício (SiO2). Sua presença confere ao granito uma dureza considerável e resistência à abrasão. O quartzo, que geralmente constitui a maior parte do granito, é um mineral composto principalmente por dióxido de silício (SiO2). Sua presença confere ao granito uma dureza considerável e resistência à abrasão.

A Tabela 35 apresenta a composição química do resíduo de rocha ornamental. Os percentuais foram obtidos através do ensaio de FRX.

Tabela 35 - Composição química do resíduo de granito.

Elementos químicos	Porcentagem de elementos (%)
SiO_2	63,1
Al_2O_3	16,9
K_2O	8,38
Fe_2O_3	4,75
CaO	4,18
SO_3	1,23
TiO_2	1,09
Sc_2O_3	0,13
MnO	0,09
V_2O_5	0,05
ZrO_2	0,05
SrO	0,03
Rb_2O	0,02
Y_2O_3	0,01

4.1.6. RESULTADO DO ENSAIO DE DIFRAÇÃO DE RAIO X (DRX)

Os picos mineralógicos observados correspondem ao Albita, Quartzito, e o Ortoclásio, a presença desses materiais é comum nesta material, a biotita em alguns casos também está presente. A análise detalhada da composição mineralógica fornece informações valiosas sobre as propriedades físicas e químicas do granito, ajudando a determinar sua adequação para diversas aplicações, desde a construção civil até a indústria de rochas ornamentais. A Figura 54 apresenta o resultado do ensaio de DRX.

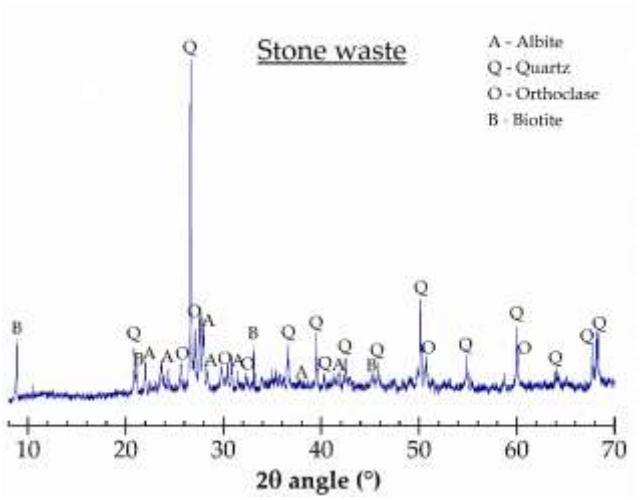


Figura 54 - Resultado do Ensaio de Difração de Raio X (DRX).

4.2. METÓDO DE DOSAGEM - EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS E OKAMURA E OUCHI

Antes de executar os ensaios do método do Okamura e Ouchi foi feito um estudo de empacotamento de partículas para indicar a distribuição granulométrica ótima com o máximo de empacotamento. Para este estudo foi utilizado uma planilha elaborada com os parâmetros da EFNARC 2005 para produzir o microconcreto autoadensável. A dosagem do microconcreto de referência foi utilizada para fazer os ajustes para o melhor empacotamento e através dele foi produzida as demais composições. Os percentuais de resíduos foram escolhidos durante a fase da revisão bibliográfica. A Figura 55 apresenta a curva de Andreasen Modificada (Alfred) com o empacotamento das composições.

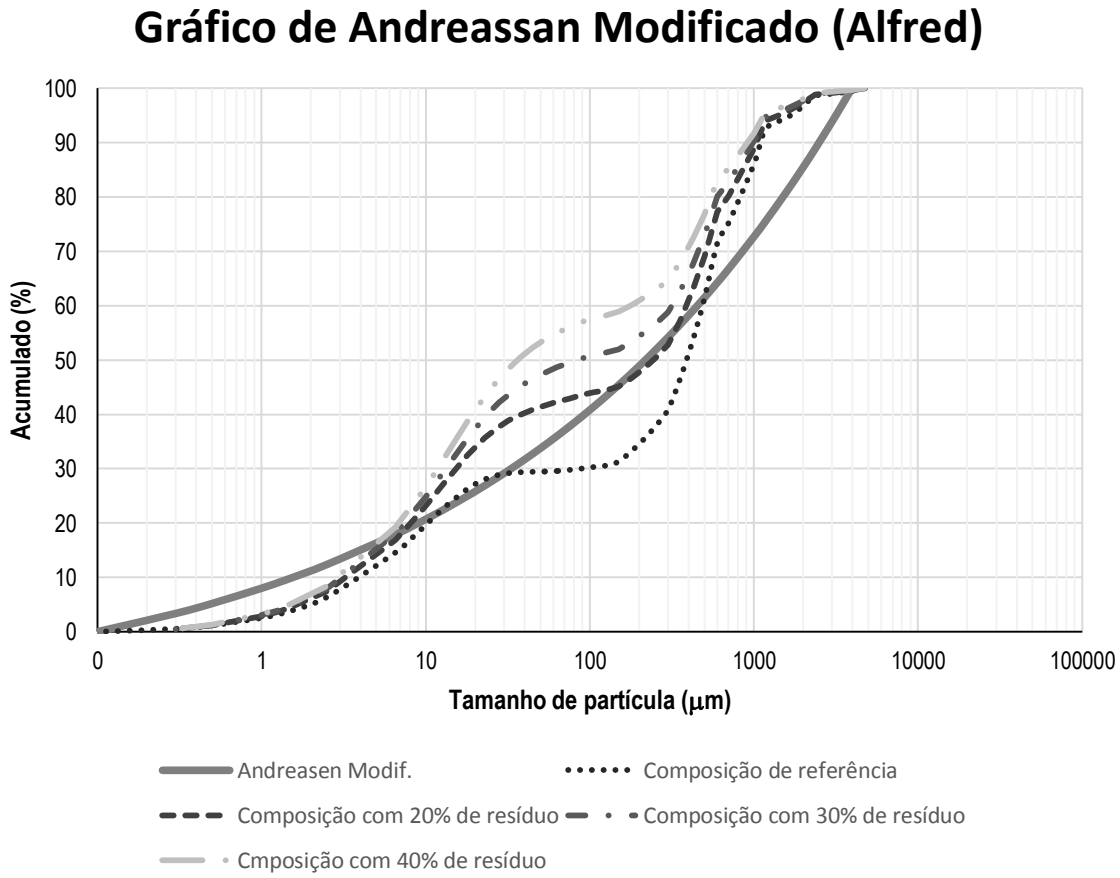


Figura 55 - Curva de Alfred com o empacotamento das composições.

Através desses resultados da curva granulométrica de Alfred foram feitos os ensaios com o mini cone, para descobrir a dosagem ideal de água, superplastificante e modificador de viscosidade. A quantidade de areia, cimento e água foram fixos, a quantidade de resíduo foi modificada para cada composição de acordo com a porcentagem de 20%, 30% e 40%, assim também foi feito com o superplastificante e modificador de viscosidade. A Tabela 36 apresenta as composições a partir dos estudos da Curva de Andreassen.

Tabela 36 - Composições dos mircroconcretos após o estudo de empacotamento de partículas.

Composições	**Cimento (Kg/m³)**	**Areia (Kg/m³)**	**Resíduo de granito (Kg/m³)**
MCARG0	600	1347,50	0
MCARG20	600	1078	273,55
MCARG30	600	943,25	410,32
MCARG40	600	808,50	547,10

Legenda:

MCARG0 _ Composição de referência

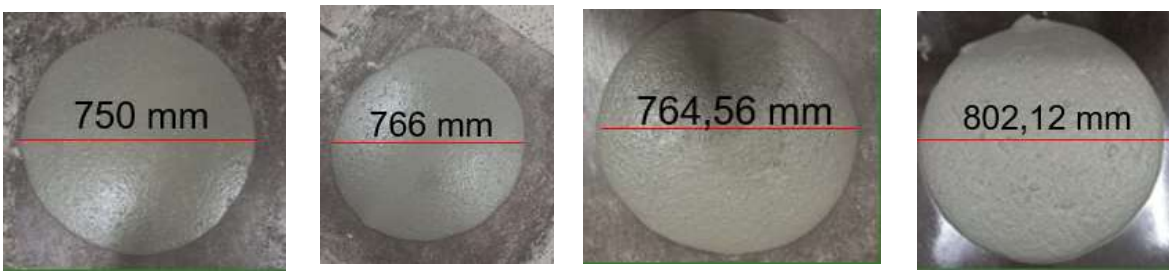
MCARG20 _ Composição com incorporação de 20% de resíduo

MCARG30 _ Composição com incorporação de 30% de resíduo

MCARG40 _ Composição com incorporação de 40% de resíduo

Após fazer os empacotamentos das composições, o valor da água foi fixado e logo a pós foram feitos os testes no mini slump, a faixa para concreto autoadensável é de 550 a 850, de acordo com a NBR (ABNT 15823-1/2010)

As Figuras 56 a) composição de referência, b) composição com 20% de resíduo, c) composição com 30% de resíduo e d) composição com 40% de resíduo, apresentam os resultados dos ensaios do método de Okamura e Ouchi.



a) b) c) d)

Figura 56 - a) Composição de referência; b) composição com 20% de resíduo; c) Composição com 30% de resíduo; d) composição com 40% de resíduo.

A partir dos resultados do empacotamento de partículas e do ensaio de mini cone foi descoberta a dosagem ideal de material para cada composição. A Tabela 37 apresenta as composições a partir dos estudos da Curva de Alfred e do ensaio de mini slump.

Tabela 37 - Composições dos mircroconcretos após o estudo de empacotamento de partículas.

Composições	**Cimento (Kg/m³)**	**Areia (Kg/m³)**	**Resíduo de granito (Kg/m³)**	**Água (g)**	**SP (g)**	**MV (g)**
MCARG0	600	1347,50	0	240	1,1	1,1
MCARG20	600	1078	273,55	240	0,9	0,9
MCARG30	600	943,25	410,32	240	1	1
MCARG40	600	808,50	547,10	240	1,05	1,05

4.3. RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Os ensaios no estado fresco foram analisados e classificados quanto as suas propriedades de tempo de escoamento, espalhamento, índice de estabilidade visual, viscosidade aparente medida no T_{500} durante o ensaio de espalhamento (ABNT NBR 15823-2, 2017) e Funil V (ABNT NBR 15823-5, 2017), habilidade passante em fluxo livre através do ensaio de Anel J (ABNT NBR 15823-3, 2017) e habilidade passante em fluxo confinado Caixa L (ABNT NBR 15823-4, 2017). A Tabela 38 apresenta os resultados dos ensaios citados acima.

Tabela 38 - Resultados e classificação dos microconcretos de acordo com a norma ABNT NBR 15823-1 (2017).

Microconcreto	Espalhamento (*Slump flow*)	Índice de estabilidade visual	Viscosidade aparente		Habilidade passante	
			T_{500} (seg.)	Funil V (seg.)	Anel J (mm)	Caixa L HP (H2/H1)
MCARG0	565 SF 1	IEV 0	06:01 VS 2	11:55 VF 2	9 PJ 1	0,71
MCARG20	957	IEV 1	04:08 VS 2	10:38 VF 2	11 PJ 2	0,96 PL 2
MCARG30	1023	IEV 1	04:01 VS 2	10:25 VF 2	18 PJ 2	0,81 PL 1
MCARG40	1050	IEV 1	03:02 VS 2	11;59 VF 2	20 PJ 2	-

Os critérios mínimos para aceitação do Concreto Autoadensável (CAA) em seu estado fresco são determinados pela verificação da coesão, fluidez/espalhamento e habilidade passante. Além disso, o índice de estabilidade visual também é um requisito conforme estabelecido pela ABNT NBR 15823-1 (2017) e EFNARC (2005).

A classificação dos concretos segue a seguinte categorização: SF 1, recomendado para estruturas não armadas com baixa taxa de armaduras; SF 2, apropriado para aplicações comuns, como paredes, vigas e pilares; e SF 3, que oferece o melhor acabamento de superfície para aplicações gerais. No entanto, é mais desafiador controlar a resistência à segregação no SF 3 em comparação com o SF 1 e o SF 2.

A avaliação qualitativa dos quatro microconcretos em relação ao índice de estabilidade visual é mostrada na Tabela 38.

O MCARG0 foi classificado altamente estável sem evidência de exsudação, já os MCARG20, MCARG30 e o MCARG40, observou-se uma leve exsudação em torno do seu espalhamento. As Figuras 57 e 58 mostram o ensaio do *slump flow* e o índice de estabilidade visual do MCARG30 e o MCARG40.

Figura 57 - Resultado do Slump flow e índice de estabilidade visual do MCARG30.

Figura 58 - Resultado do Slump flow e índice de Estabilidade visual do MCARG40.

Os resultados e classificação quanto à viscosidade aparente os quatro microconcretos, foram classificados como VF 2. De acordo com a ABNT NBR 15823-1 (2017) esses concretos são classificados como tixotrópicos, tem a menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação.

Na Tabela 38 também é apresentado o resultado do ensaio Anel J, que verifica a habilidade passante, todos os mircroconcretos foram classificados como PJ2. A Caixa L utilizada possuía 3 barras de aço, o MCARG20 e MCARG30 foram classificados como PL2, o MCARG0 não atingiu o valor de HP mínimo 0,80, definido como o mínimo para a razão entre as alturas e da superfície de concreto nas extremidades da câmera horizontal. O MCARG40 não foi possível fazer o ensaio pois o microconcreto não estava maleável.

Observa-se na Tabela 38 que os microconcretos MCARG20, MCARG30 e MCARG40 não possuem a classificação de fluidez adequada para Concreto autoadensável de acordo com a norma da ABNT 15823-1 e EFNARC 2005.Os microconcretos obtiveram a classificação o VF2 (alta viscosidade). O MCARG40 teve o índice de IEV 0 no qual não demonstrou exsudação ou segregação, já os demais microconcretos obtiveram a classificação IEV 1, que houve uma leve exsudação. O MCARG40 obteve as características citadas acima, porém ele não teve trabalhabilidade.

Todos os ensaios foram realizados com temperatura e umidade ambiente.

Foi possível observar que o tempo de autoadensabilidade foi diferente para todas, quanto maior a porcentagem de resíduo mais tempo o microconcreto ficava na betoneira, para todas as composições foi utilizado o mesmo superplastificante e o mesmo modificador de viscosidade, porém em quantidades diferentes As Figuras 59 a), b), c) e d), apresentam todos os ensaios realizados no estado fresco com os microconcretos para melhor entendimento.

a)

b)

c)

d)

Figura 59 - Ensaios com as composições de microconcreto autoadensáveis: a) slump flow e T500 e índice de estabilidade visual, b) funil V, c) anel J, d) caixa L.

Os resultados dos ensaios foram construídos gráficos para comparar as propriedades da autoadensabilidade em relação a substituição da areia por resíduo de rocha ornamental. A Figura 60 apresenta o resultado do ensaio de espalhamento.

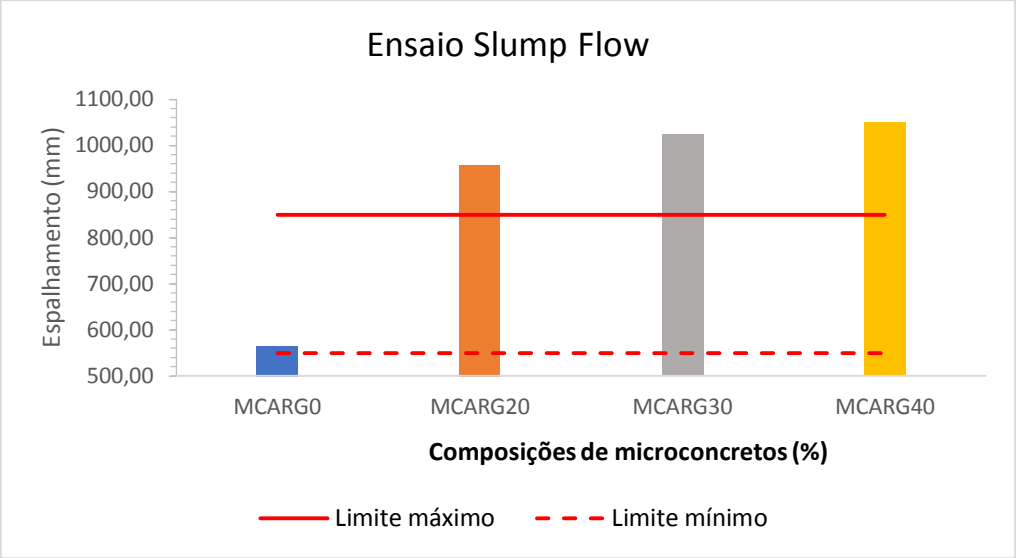


Figura 60 - Resultado do ensaio *slump flow.*

Em relação aos microconcretos segundo a norma da ABNT NBR 15823-1 (2017) e EFNARC (2005) que classifica o diâmetro de espalhamento *(slump flow)* entre 550 a 850 mm, conforme a fluidez. Pode-se observar que três tipos de microconcreto não apresentam resultados dentro deste intervalo, não estão de acordo com o parâmetro estabelecido segundo a norma ABNT NBR 15823-1 (2017) e EFNARC (2005), em casos especiais o limite de espalhamento pode passar de 850 mm. O menor índice de espalhamento foi o do MCARG0 e o maior índice foi do MCARG40. Notou-se que quanto maior a incorporação de resíduo, aumentava também a quantidade de superplastificante e modificador de viscosidade, consequentemente as composições ficavam mais fluídas, isso pode ter acontecido devido ao aumento de atrito substancial entre o cimento e o resíduo de rocha ornamental.

A densidade mais baixa e a área superficial mais alta das partículas de resíduo de granito pode ter aumentado a necessidade de conteúdo ligante em misturas de microconcreto autoadensável com adição de resíduo de granito em comparação a composição de referência.

Como a quantidade de cimento foi mantido constante para todas as misturas de microconcreto, o déficit de teor ligante necessário resultou em maior viscosidade e, assim houve a necessidade de dosagem de superplastificante e modificador de viscosidade.

Foi observado também que quanto maior era a substituição de areia por resíduo de granito, menor era a trabalhabilidade, as composições tiveram o início de pega acelerado, sendo assim houve o endurecimento precoce.

A ABNT NBR 15823-1 (2017), prescreve que para analisar a viscosidade plástica é necessário realizar o ensaio de T_{500}, que tem a função de medir o tempo necessário para que o concreto atinge a marca de 500 mm ao espalhar sobre a placa da base. Todos os microconcretos ensaiados atingiram as conformidades citadas na norma, eles atingiram o tempo superior de 2 segundos sendo assim classificados como VS 2. Quanto maior é o tempo de escoamento do concreto maior é a sua viscosidade.

De acordo com a norma ABNT NBR 15823-1 (2017), os concretos são classificados em termos de viscosidade com base no tempo de escoamento da mistura do ensaio funil V. Pode-se observar na Figura 61 que todos os microconcretos estão aceitáveis, eles apresentaram o tempo de escoamento inferiores ao limite máximo de 25 segundos.

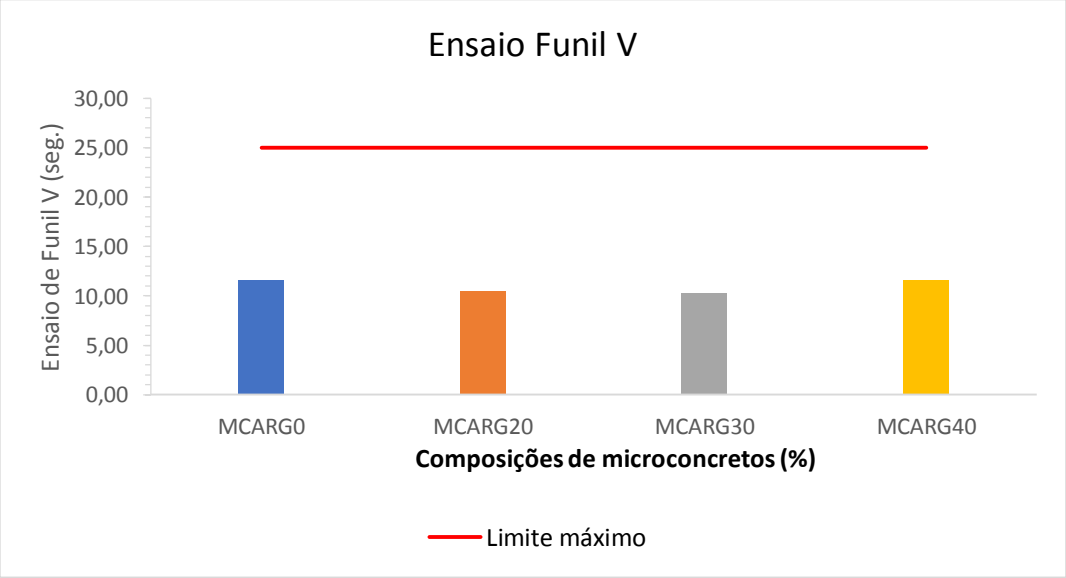


Figura 61 - Resultado do ensaio Funil V.

O ensaio do anel J verifica a habilidade passante das misturas de MCAA, de acordo com os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 15823-1 (2017). Os resultados alcançados foram satisfatórios para todos os MCAA. Observa-se na Tabela 38 que os microconcretos apresentaram diferenças entre o diâmetro de

espalhamento sem e com anel J, abaixo do limite de máximo de 50 mm. Os resultados demonstraram que quanto maior a adição do resíduo de granito nas composições, maior foi a fluidez, a coesão era moderada. A Figura 62 apresenta o resultado do ensaio do Anel J.

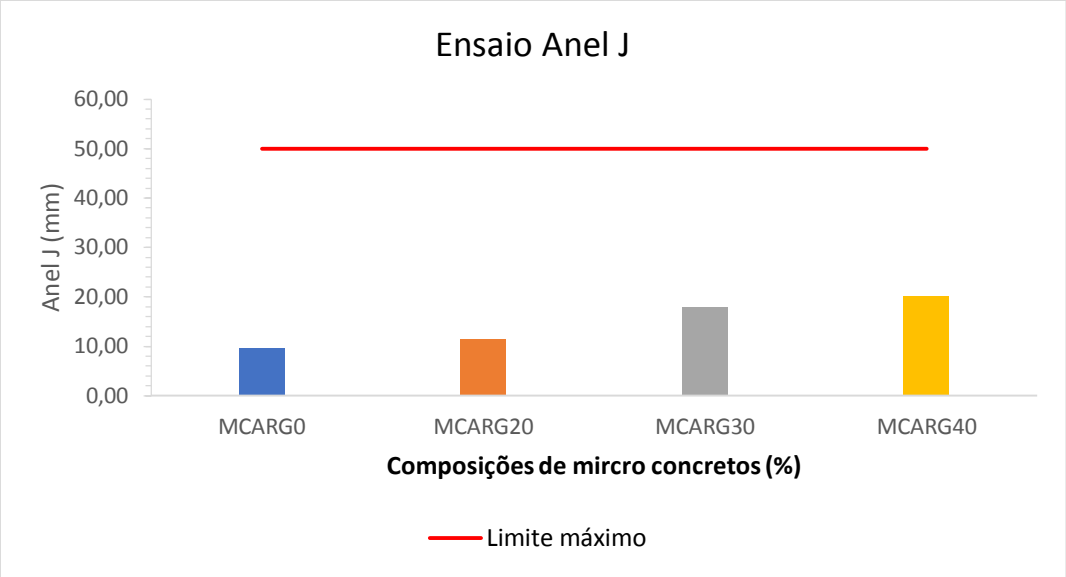


Figura 62 - Resultado do ensaio do Anel J.

O ensaio da caixa L avaliou nos MCAA a sua habilidade de passagem por obstáculos, sob fluxo de escoamento confinado e a coesão. A ABNT NBR 15823-1 (2017) estabelece o valor mínimo de 0,80 para a razão H2/H1, obtido durante o ensaio. O MCARG0 obteve a razão menor que 0,80 sendo assim não obtém uma boa habilidade passante e coesão de acordo com os critérios estabelecidos pela norma. Os demais microconcretos atenderam os requisitos da norma. A Figura 63 apresenta o resultado do ensaio da Caixa L.

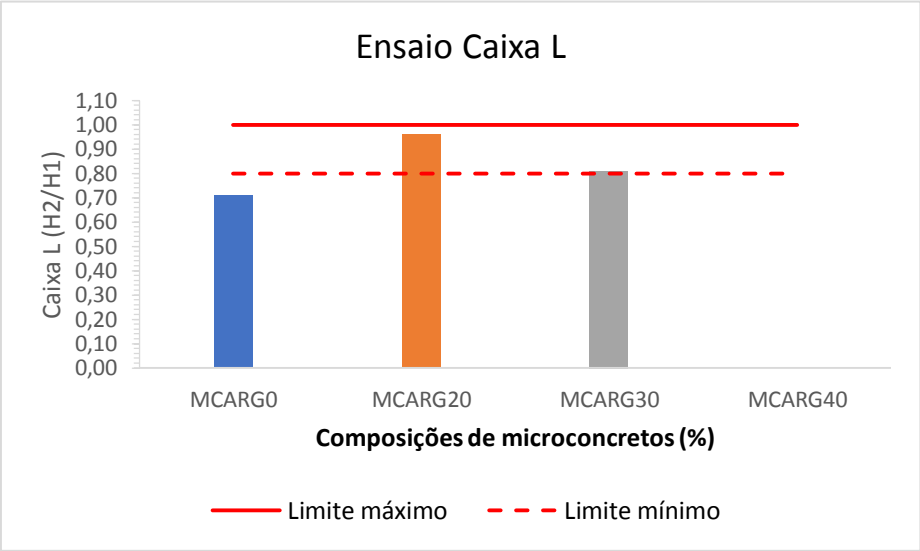


Figura 63 - Resultado do ensaio da Caixa L.

A Figura 64 apresenta o concreto utilizado na concretagem das vigas. No concreto foi feito o ensaio de abatimento do tronco de cone conforme a ABNT NBR 16889 (2020), atingindo o valor de 170 mm.

Figura 64 - Concreto utilizado na concretagem das vigas.

4.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Neste item são apresentados e analisados os resultados dos microconcretos autoadensáveis no estado endurecido, quanto às propriedades de resistência à compressão de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (2018), resistência à tração

por compressão diametral seguindo a ABNT NBR 7222 (2011), massa específica, absorção de água e índice de vazios seguindo os critérios da ABNT NBR 9778 (2009). Os resultados foram apresentados em forma de gráficos para a comparação entre os tipos de microconcretos analisados com as suas adições.

4.4.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 5739 (2018), para as idades de 7, 14, e 28 dias, os resultados foram calculados através da média de três corpos de prova, para cada idade. Foram construídos gráficos para a comparação dos resultados entre os microconcretos de referência, e com a substituição parcial da areia por resíduo de rocha ornamental de 20%, 30% e 40%. A Figura 65 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão para as diferentes idades analisadas.

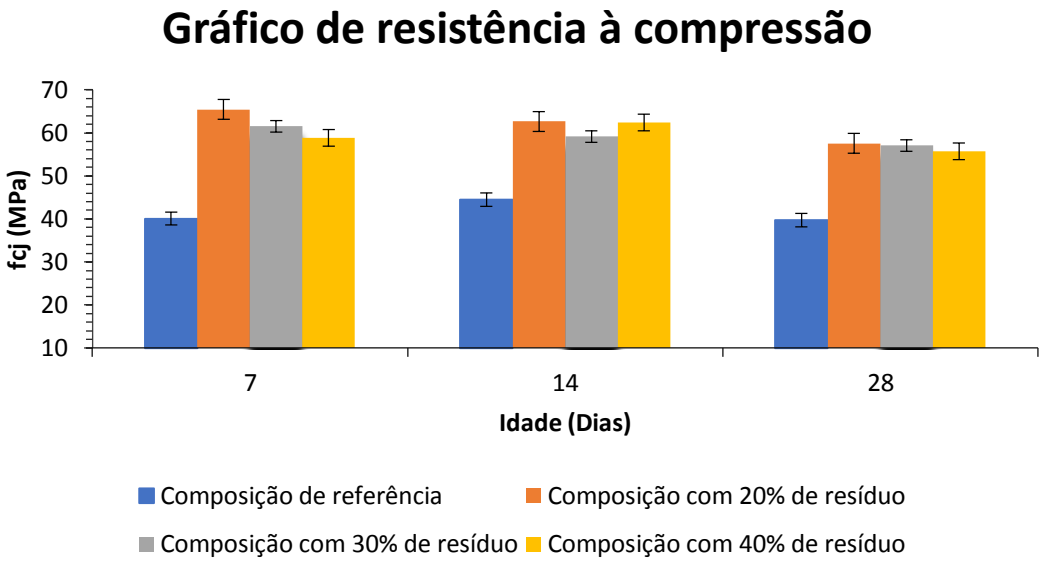


Figura 65 - Resultado do ensaio de Resistência à compressão.

Observa-se na Figura 65 que os microconcretos apresentam acréscimo da resistência à compressão em 7, 14 e 28 dias. Observa se também que o MCARG20 obteve a maior resistência e a menor resistência foi do MCARG0 que não possuía resíduo de granito. Todas as composições com substituição parcial da areia por resíduo de rocha ornamental apresentaram a resistência maior do que a composição

de controle. De acordo com a análise estatística (ANEXO 1) não houve variância entre as composições MCARG20, MCARG30 e MCARG40, a composição MCARG0, apresentou diferença entre as demais.

A Figura 66 apresenta os corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão.

Figura 66 - Corpos de prova após o ensaio de resistência à compressão.

4.4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

O ensaio de resistência à tração foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7222 (2011), nas idades de 7, 14 e 28 dias, os resultados foram calculados através da média de três corpos de prova, para cada idade. Foram construídos gráficos para a comparação dos resultados entre os microconcretos de referência, e com a substituição parcial da areia por resíduo de rocha ornamental de 20%, 30% e 40%. A Figura 67 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração.

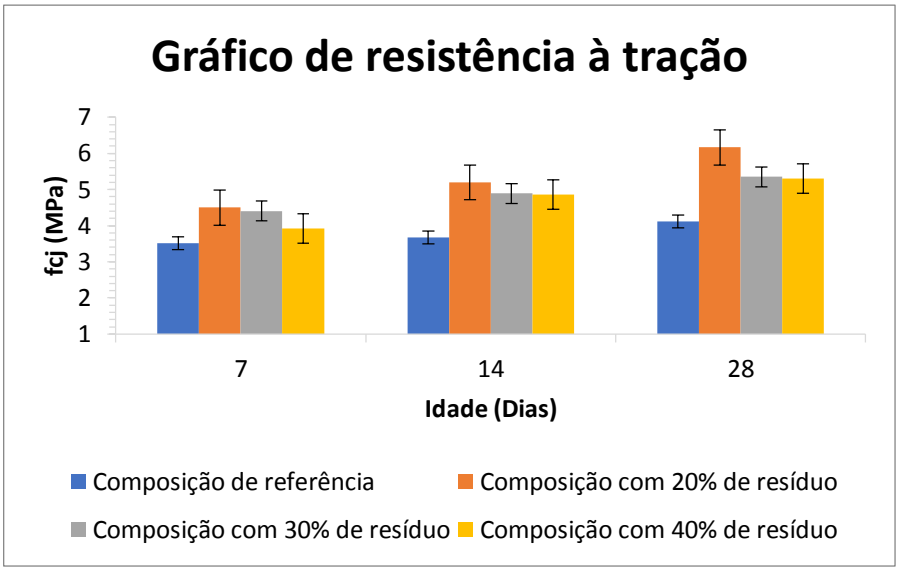


Figura 67 - Gráfico de resistência à tração.

Na Figura 67 observa-se que os microconcretos apresentam acréscimos da resistência à tração nas idades 7, 14 e 28 dias. Observa-se que o MCARG20 obteve a maior resistência a tração e a menor resistência foi do MCARG0. Todas as composições com substituição parcial da areia por resíduo de rocha ornamental apresentaram a resistência maior do que a composição de controle. De acordo com a análise estatística (ANEXO 1) houve duas variâncias entre as composições, as misturas MCARG20 e MCARG30, não tiveram diferença estáticas entre elas, e as composições MCARG0 e MCARG40, tiveram diferenças estatísticas com as demais composições.

A Figura 68 apresenta os corpos de prova após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Figura 68 - Corpos de prova após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

As Tabelas 39 e 40 apresentam o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados de resistência à compressão e à tração respectivamente.

Tabela 39 - Resultado do ensaio de resistência à compressão com 28 dias.

Composição	**Resistência à compressão (MPa)**	**Média (MPa)**	**Desvio Padrão (MPa)**	**Coeficiente de variação (%)**
$MCARG_0$	40,12	41,45	2,67	6,4
	44,12			
	39,71			
$MCARG_{20}$	65,45	61,93	3,98	6,4
	62,74			
	57,61			
$MCARG_{30}$	67,46	61,23	5,49	8,9
	59,19			
	57,06			
$MCARG_{40}$	58,87	60,72	6,10	10
	67,53			
	55,76			

Tabela 40 - Resultados do ensaio de resistência à tração com 28 dias.

Composição	Resistência à tração (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
$MCARG_0$	4,56	4,21	0,49	11,6
	4,42			
	3,65			
$MCARG_{20}$	6,02	6,17	0,13	2,1
	6,21			
	6,27			
$MCARG_{30}$	5,26	5,10	0,15	2,9
	5,08			
	4,97			
$MCARG_{40}$	4,25	5,3	0,91	17,2
	5,78			
	5,87			

Observa-se que o MCARG20 atingiu a maior resistência, com a incorporação de 20% de resíduo de granito e com o aumento de substituição a resistência à compressão e tração do microconcreto diminuiu.

4.4.3. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Para avaliar os efeitos da substituição parcial da areia por resíduo de rocha ornamental nas propriedades do MCAA foram feitos os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica de acordo com a ABNT NBR 9778 (2009), para isto, foram utilizados corpos de prova com 90 dias de cura. Na Tabela 41 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 41 - Resultados de massa específica, absorção de água e índice de vazios em corpos de prova de CAA, aos 90 dias de idade, conforme a (ABNT NBR 9778 (2005).

Composição	Massa da amostra (g)	Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica (g/cm^3)
MCARG0	1.280	8,41	16,42	2,25
MCARG20	1.385,82	8,35	15,84	2,33
MCARG30	1.386,85	7	14,82	2,43
MCARG40	1.388,70	6,78	14,17	2,48

O MCARG40 entre todos os teores de substituições, teve a massa específica mais elevada. Observou-se que quanto maior a substituição da areia por resíduo de granito, mais elevada foi a densidade do material.

É fundamental estudar a massa específica, o índice de vazios e a absorção de água do concreto após sua solidificação, pois esses elementos auxiliam na avaliação da eficácia da estrutura granular. A inclusão de partículas mais finas no Microconcreto autoadensável (MCAA) favorece um melhor ajuste entre os grãos, resultando em benefícios significativos na resistência mecânica do concreto já solidificado. Além disso, essa inclusão contribui no preenchimento dos vazios. Consequentemente, quanto menor for o índice de vazios, maior será a densidade do material e menor será sua capacidade de absorção.

Observa-se que o MCARG40 obteve a menor absorção de água e índice de vazios, isso pode ter ocorrido porque as partículas finas diminuíram o número de vazios. O MCARG0 foi o que obteve maior absorção de água e índice de vazios, as demais composições tiveram um bom desempenho nesses ensaios.

4.4.4. CONCRETO CONVENCIONAL (VIGAS)

De acordo com a ABNT 12655 (2015 e Emenda 1: 2022), concreto utilizado nesta pesquisa é classificado com a condição de reparo A. O cimento, os agregados, a água e o superplastificante foram medidos em massa. O desvio padrão das resistências mecânicas deve ser no máximo 4,0 MPa. As Tabelas 42 e 43 apresentam os resultados da resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral médios de 31,66 MPa e 3,19 MPa, respectivamente.

Tabela 42 - Resistência à compressão do concreto convencional das vigas e seus parâmetros estatísticos.

CPs	**Resistência à compressão (MPa)**	**Média (MPa)**	**Desvio padrão (MPa)**	**Coeficiente de variação (%)**
1	31,5	31,67	2,06	6,50
2	33,8			
3	29,7			

Tabela 43 - Resistência à tração por compressão diametral do concreto convencional das vigas e seus parâmetros estatísticos.

CPs	Resistência à tração (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
1	2,93	3,10	0,15	4,8
2	3,18			
3	3,19			

4.4.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO DO REPARO

Foi feito o ensaio de resistência à compressão e tração do reparo aos oitenta dias, para descobrir se houve alguma diferença nas resistências à compressão e tração. As Tabelas 44 e 45 apresentam os resultados dos ensaios com a análise estatística média, desvio padrão, coeficiente de variação e no Anexo 2 apresenta a análise estatística pelo método da ANOVA (Tukey).

Tabela 44 - Resistência à compressão do reparo.

Composição	Resistência à compressão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
$MCARG_0$	42,25	42,30	1,10	2,60
	43,50			
	41,30			
$MCARG_{20}$	62,50	62,34	0,40	0,64
	62,64			
	61,88			
$MCARG_{30}$	62,25	62,53	0,28	0,45
	62,80			
	62,55			
$MCARG_{40}$	60,98	61,12	0,14	0,22
	61,15			
	61,25			

Tabela 45 - Resistência à tração do reparo.

Composição	Resistência à tração (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
$MCARG_0$	4,80	4,59	0,50	10,89
	4,02			
	4,95			
$MCARG_{20}$	6,45	6,73	0,26	3,86
	6,80			
	6,95			
$MCARG_{30}$	5,26	5,22	0,19	3,63
	5,02			
	5,40			
$MCARG_{40}$	5,15	4,30	0,23	5,34
	5,90			
	5,93			

Esses dados confirmam os ensaios supracitados nas Tabelas 39 (resistência à compressão) e 40 (resistência à tração) que mostram que a composição MCARG20 apresenta a maior resistência e a menor resistência pertence a MCARG0. Observa-se que as resistências à compressão e à tração com as composições MCARG20, MCARG30, MCARG40, aumentaram a resistência dos microconcretos em comparação ao microconcreto de referência (MCARG0)

4.4.6. VIGAS

Ao todo 12 vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos, com carregamento crescente até a ruptura. Os dados obtidos foram coletados por inspeção visual e pelo sistema acoplado na prensa.

As fissuras foram avaliadas por meio de análise visual. Observou-se que as fissuras se iniciaram na região inferior inclinada do reparo, logo após no meio do vão e seguidamente as fissuras foram propagando-se para a interface do reparo e logo após para o concreto da viga.

Sabe-se que os estados-limites de serviço das estruturas trabalham no estádio I e estádio II. A separação entre esses dois estádios é definida pelo momento de fissuração, e no Estado Limite Último (ELU) o momento último. Nesta pesquisa usou-se a nomenclatura M_{fteo} (momento de fissuração teórico) e o M_{fexp} (momento de fissuração experimental), já para o ELU foi usado o Momento último teórico (M_{uteor}) e o momento último experimental (M_{uexp}). Esses momentos são calculados de acordo com a (ABNT NBR 6118 2014), pelas Equações 15 e 17.

$$M_u = 0{,}68 b_w X f_{cd} (d - 4x) \quad (15)$$

$$M_{fteof.} = \frac{\alpha f_{ct} . I_c}{y_t} \quad (17)$$

Onde:

α = 1,5 para seções retangulares;

y_t = distância do centro de gravidade da seção mais tracionada (h/2);

I_c = momento de inércia da seção transversal bruta de concreto;

f_{ct} = $f_{ct,\ sp}$; os valores utilizados para f_{ct} foram obtidos nos ensaios de tração indireta referentes a cada material utilizado no banzo tracionado da viga (região do reparo).

Após calcular a resistência à tração por compressão diametral foi feito o cálculo do momento teórico com a finalidade de comparar este com o experimental. As vigas ensaiadas tiveram os valores I_c, α, e y_t iguais. Sendo assim os valores de M_{fteor} diferentes foi devido ao parâmetro $f_{ct,\ sp}$, obtido para cada tipo de microconcreto. Ressalta-se que a norma não leva em consideração a resistência de aderência como parâmetro de cálculo. Entretanto, foi observado que os resultados experimentais foram influenciados pela aderência do reparo ao substrato. Foi calculado o momento de fissuração teórico e logo após foi feita a comparação do momento de fissuração teórico com o momento de fissuração experimental. A Figura 69 apresenta a relação entre o M_{fteor} (número em cima das barras do gráfico)./M_{fexp} (barras do gráfico).

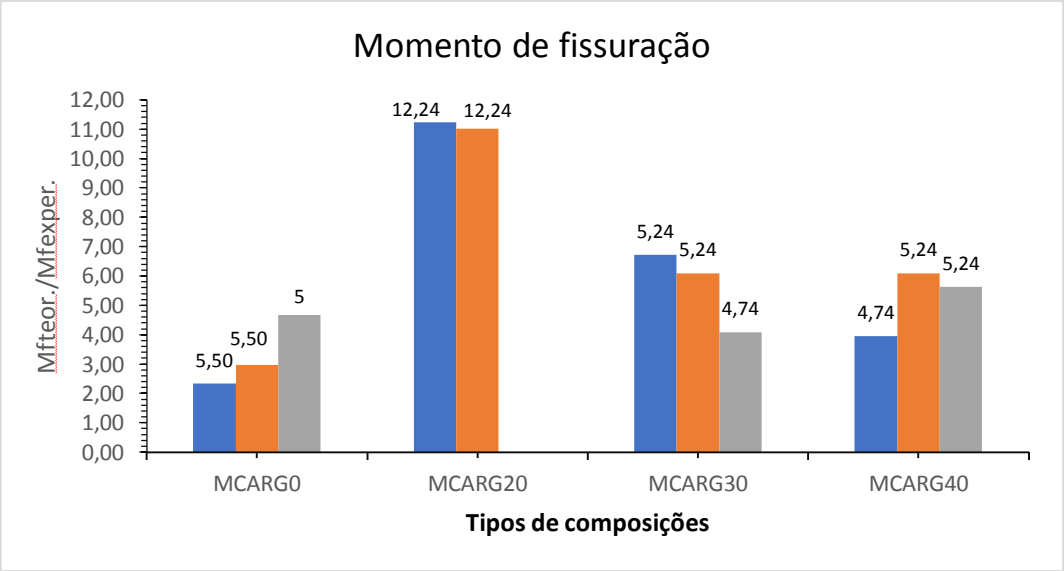


Figura 69 - Relação entre o momento de fissuração teórico e experimental para as composições dos microconcretos.

As colunas azuis representam a primeira viga de cada composição, as laranjas correspondem a segunda viga e as cinzas fazem referência à terceira viga das composições. Na Figura 69 apresenta as relações de $M_{fteo.}/M_{fexp,}$ modelo apresentado na norma 6118/2023 superestimou o valor do momento experimental, isso quer dizer que a viga fissurou a uma carga inferior ao momento teórico de fissuração. Notou-se que a viga com 20% de resíduo fissurou mais rápida do que as outras.

Foi calculado o momento último teórico das vigas e em seguida foi feita a comparação entre os valores do momento último teórico das vigas com os obtidos experimentalmente. A Figura 70 apresenta os resultados com as comparações, onde os valores acima do gráfico são representados pelo momento último teórico e as barras momento último experimental.

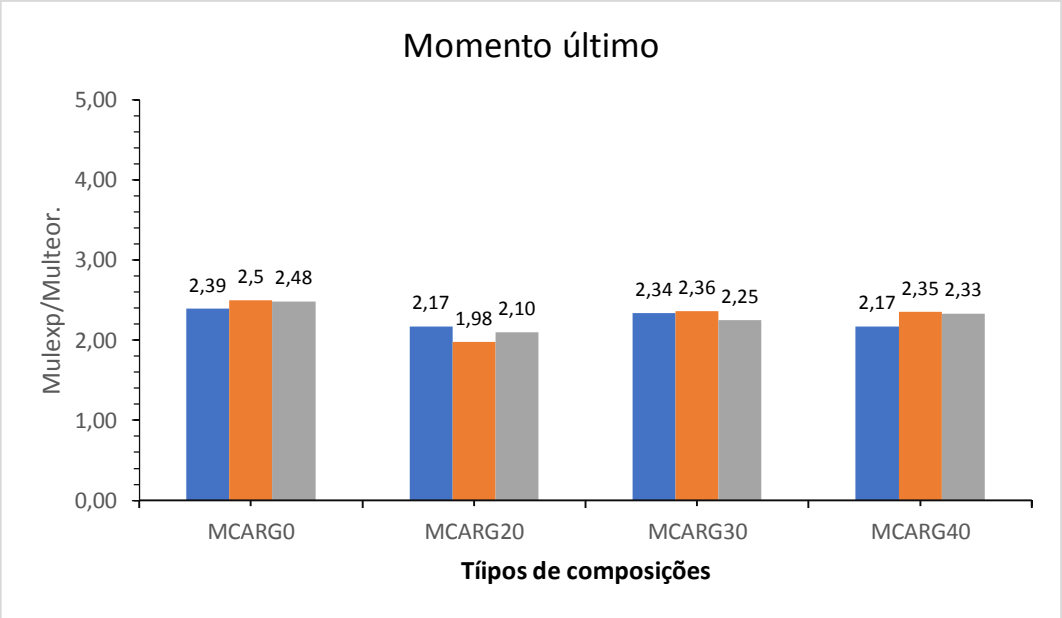
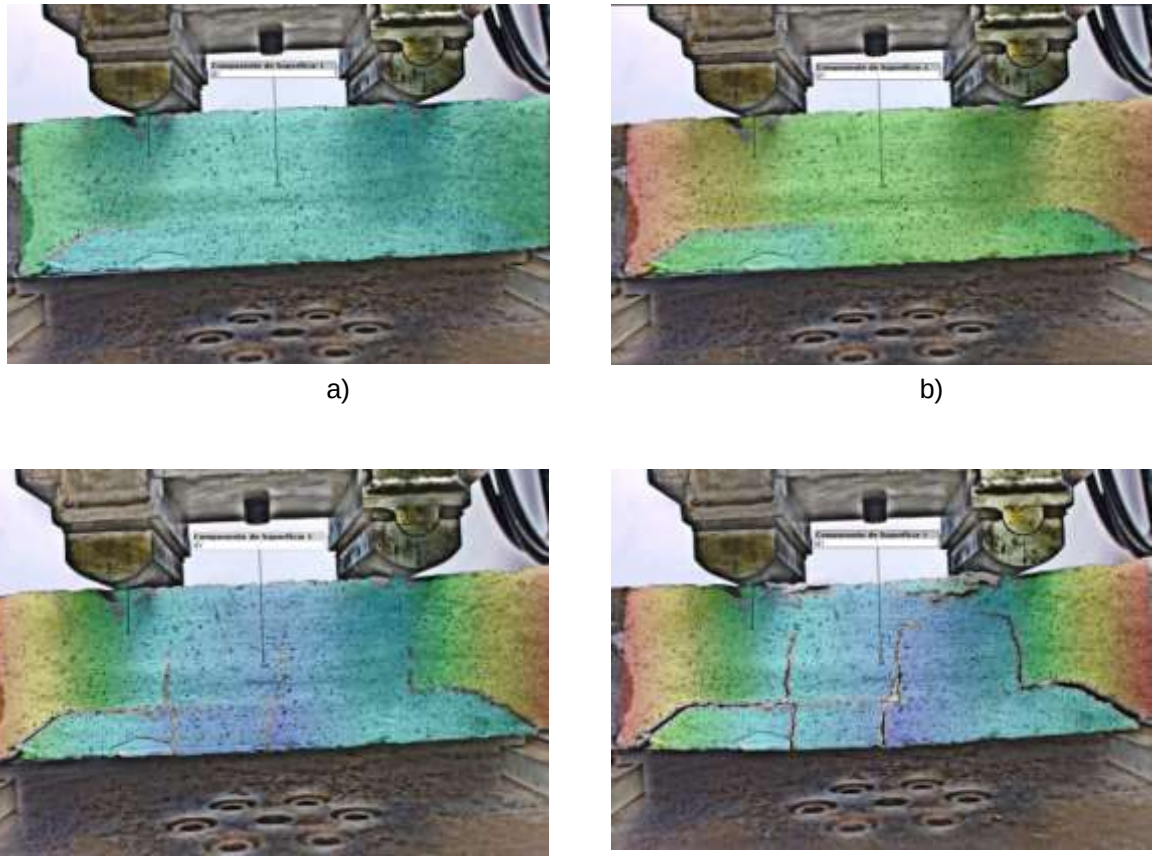


Figura 70 - Relação entre o momento último teórico e experimental para as composições dos microconcretos.

A Figura 70 representa a relação entre o momento último teórico e o momento último experimental sendo notório que o momento último teórico é inferior ao momento último experimental.

Na maioria dos casos as vigas começaram a fissurar do lado esquerdo da viga, logo após no lado direito e por último no meio da viga (flexão). A viga começou a fissurar primeiro no lado esquerdo devido o apoio ser de primeiro gênero, restringiu o movimento na horizontal, já no lado direito o apoio foi de segundo gênero, restringindo o movimento na horizontal e vertical. A Figura 71 apresenta: a) Fissura do lado esquerdo viga, b) Fissura do lado direito da viga, c) Fissura no meio da viga (flexão) e d) viga após a ruptura.



a) b)

Figura 71 - a) Fissura no lado esquerdo da viga. b) Fissura do lado direito da viga. c) Fissura no meio da viga (flexão) e d) viga após a ruptura.

Em todas as vigas ocorreu o desprendimento da área inclinada do reparo e o desenvolvimento da fissura para o concreto. A viga começou a fissurar na parte inclinada do reparo e depois se propagou para o concreto a partir da interface da região horizontal da viga. Esse tipo de ruptura pode ter ocorrido pela baixa aderência do reparo ao substrato. Neste caso a assistência entre o reparo e substrato foi desfeita e armadura de tração foi solicitada, ocasionando assim a ruptura por deformação excessiva do aço. As Figuras 72 apresentam as vigas: a) Viga de referência, b) Viga com incorporação com 20% de resíduo, c) Viga com 30% de resíduo e Viga com 40% de resíduo.

a)

b)

c)

d)

Figura 72 - a) Viga de referência, b) Viga com incorporação com 20% de resíduo, c) Viga com 30% de resíduo e Viga com 40% de resíduo.

As Figuras 73 e 74 apresentam os gráficos de fissura de cisalhamento à esquerda e a direita respectivamente.

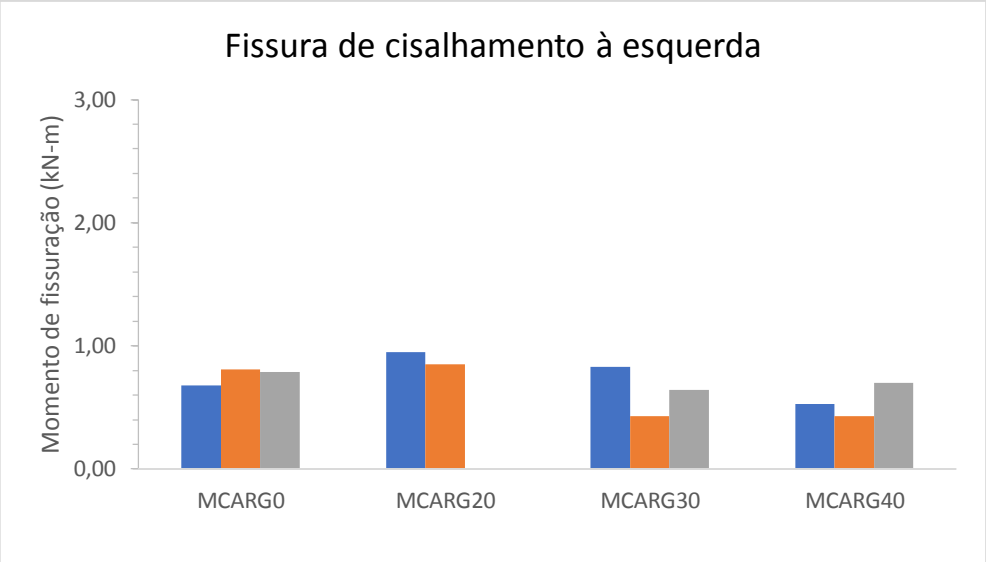


Figura 73 - Fissura de cisalhamento à esquerda.

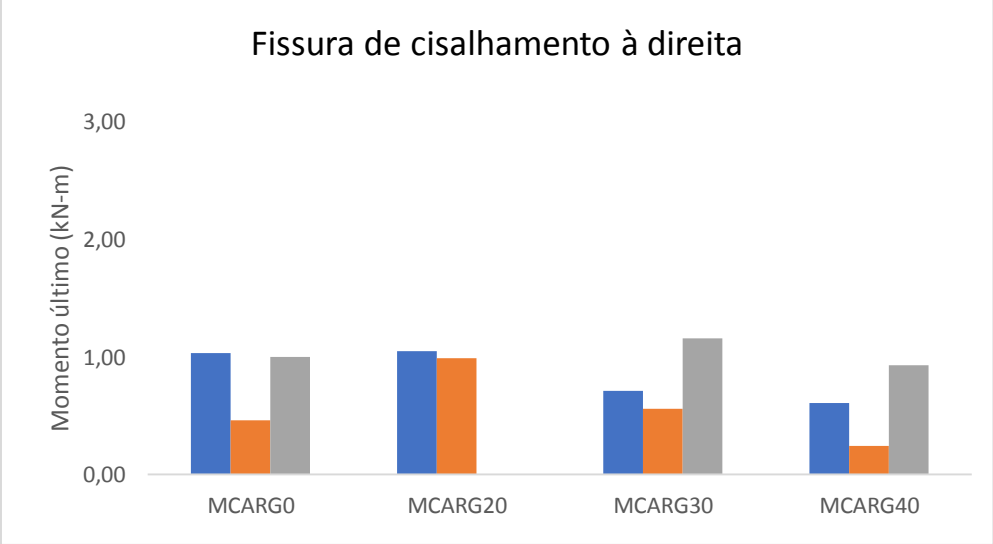


Figura 74 - Fissura de cisalhamento à direita.

Observou-se que o momento de fissuração de cisalhamento do lado direito foi maior do que esquerdo, ou seja, o lado direito teve maior resistência. A maior porcentagem de diferença de fissuração entre o lado esquerdo e direito foi de 21% na composição MCARG30.

Em pesquisa feita por (França *et al.* 2018), foi proposto 3 tipos de reparos diferentes para as vigas iguais a pesquisa apresentada acima. O reparo 1 ACQT (argamassa comercial Quartzolit com cura à temperatura ambiente), reparo 2 ACQU

(argamassa comercial Quartzolit com cura úmida), reparo 3 AGT1 argamassa geopolimérica com o traço 1: 1,2:0,36 e reparo.

Foi feito o ensaio de resistência à compressão e tração do concreto e nas vigas foi feito o ensaio de resistência à tração de quatro pontos. A Tabela 46 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão e a tração das argamassas.

Tabela 46 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração das argamassas.

Material	**Resistência à compressão (MPa)**	**Resistência à tração (MPa)**
ACQT	12,9	1,7
ACQU	24,9	2,3
AGT1	25,2	2,7

Na pesquisa concluiu-se que a resistência à compressão e tração são semelhantes entre ACQU e AGT1, porém a argamassa geopolimérica obteve melhor desempenho que a argamassa comercial, devido a sua superior aderência da argamassa ao concreto de substrato. As vigas com a argamassa de geopolímero apresentou-se como se fosse monolítica, não houve desprendimento entre a argamassa e o concreto ao contrário da ACQT e ACQU que começou a fissurar na argamassa de reparo, depois passou para o concreto e logo após teve o deslocamento entre o reparo e o concreto (França *et al.* 2018).

Conclui-se que as argamassas de (França *et al.* 2018), possuíram a resistência à compressão e tração menores do que as apresentadas neste trabalho, consequentemente a resistência à tração das vigas também são menores. Os reparos ACQT e ACQU apresentou deslocamento entre o reparo e o concreto, isso pode ter ocorrido por causa de baixa aderência entre o material e o substrato.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa avaliou a viabilidade técnica da produção de microconcreto autoadensável com a substituição parcial da areia por resíduo de rocha ornamental (granito), foram feitas quatro composições sendo uma de referência sem incorporação de resíduo, e 3 teores de substituição 20%, 30% e 40%. A pesquisa também avaliou a viabilidade de fabricação de reparos para as vigas de concreto.

O concreto MCARG0 alcançou a autoadensabilidade, os demais concreto passaram do máximo, porém na ABNT NBR 15823-1, está escrito que em casos especiais a autoadensabilidade do concreto pode passar de 850 mm de espalhamento, tomando todos os cuidados necessários para evitar a segregação.

Todos os microconcretos atingiram o T_{500} em mais de dois segundos, de acordo com ABNT NBR 15823-1 esse tempo é bom, sendo assim eles têm a classificação VS 2 / VF 2, tendo uma boa resistência à segregação e maior viscosidade. O microconcreto MCARG0 obteve o índice de estabilidade visual de IEV 0, sem evidência de segregação ou exsudação, os demais microconcretos foram classificados como IEV 1, não tiveram evidência de segregação, porém houve uma leve exsudação nos demais microconcretos.

No ensaio do Funil V todos os microconcretos ficaram na classe de viscosidade plástica aparente VS 2 / VF 2, tendo assim uma maior resistência à segregação.

A diferença dos microconcretos autoadensáveis entre os ensaios de *Slump Flow* e Anel J foi menor do que 25 cm, sendo assim considerado PL 1, estando todos de acordo com a norma.

A resistência à compressão e tração apresentaram resultados satisfatórios, pois foi possível reduzir o consumo de areia, em todos os teores com a substituição parcial da areia por resíduo de rocha ornamental, atingido resultados de resistência à compressão de 33,37% e resistência à tração de 26,09 % em relação a composição controle.

Nos ensaios de absorção de água e índice de vazios a composição que obteve o melhor resultado foi a mistura MCARG20, sendo assim a composição com maior resistência e durabilidade.

Nas vigas o momento de fissuração teórico foi maior que o momento de fissuração experimental, e o momento último teórico foi inferior ao experimental. A composição MCARG0 foi a composição que teve o maior momento experimental e a composição MCARG20 teve o maior momento último experimental comparado as outras composições.

Os concretos estudados atendem a maioria das propriedades de autoadensabilidade e resistência mecânica além de contribuírem com o meio ambiente ao utilizar resíduos industriais, diminuindo assim os impactos ambientais com a extração do agregado miúdo.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se utilizar dois tipos de agregado miúdo, um com a granulometria grossa e o outro com a granulometria fina, retirar uma parte das areias igualmente e substituir pelo resíduo de granito, para se obter um empacotamento melhor.

Aplicar este microconcreto de reparo em outras estruturas e submeter ao ensaio de flexão.

REFERÊNCIAS

ABRIROCHAS, **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2019**, ABRIROCHAS. 55 (2020).

ACI Committee, 116R. **Cement and concrete terminology.** Reported by American Concrete Institute Committee 116, 1990.

ALYOUSEF, Rayed et al. Study of the effects of marble powder amount on the self-compacting concretes properties by microstructure analysis on cement-marble powder pastes. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2018/6018613. Acesso em: 20 abr. 2024.

Parte 1. Classificação, controle e recebimento no estado fresco. NBR 15823-1. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto autoadensável. Parte 2. Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento. – Método do cone de Abrans.** NBR 15823-2. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto autoadensável. Parte 3. Determinação da habilitante passante – Método do Anel J.** NBR 15823-3. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto autoadensável. Parte 4. Determinação da habilitante passante – Método da Caixa L.** NBR 15823-4. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto autoadensável. Parte 5. Determinação da viscosidade – Método do Funil V.** NBR 15823-5. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado – Determinação da composição granulométrica.** NBR NM 248. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. NBR NM 45. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** NBR NM 6508/84.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. NBR 5739.** Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** NBR 7222/2010. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** NBR 12142. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Projeto de estruturas de concretp.** NBR 6118. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Concreto – Projeto de estruturas de concreto.** NBR 16697. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.** NBR 16916. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** NBR 9778.2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Concreto determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone NBR 16889.2020.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água.** NBR 16916. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** NBR 7215.20219.

AYDIN, Gokhan; KAYA, Serkan; KARAKURT, Izzet. Utilization of solid-cutting waste of granite as an alternative abrasive in abrasive waterjet cutting of marble. **Journal of Cleaner Production**, v. 159, p. 241-247, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.173. Acesso em: 20 abr. 2024.

AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez et al. Effect of granite residue incorporation on the behavior of mortars. **Materials**, v. 12, n. 9, p. 1449, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ma12091449. Acesso em: 20 abr. 2024.

BACARJI, E. et al. ANÁLISE DO EFEITO DE ADIÇÃO DE DIFERENTES TEORES DE PÓ DE GRANITO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MICROCONCRETO. **REVISTA UNIARAGUAIA**, v. 4, n. 4, p. 11-24, 2013. Disponível em: index.php/REVISTAUNIARAGUAIA/article/view/151. Acesso em: 15 abr. 2024.

BAEZA, F. et al. Blending of industrial waste from different sources as partial substitution of Portland cement in pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 645-653, 2014. Disponível https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.089. Acesso em: 15 abr. 2024.

BAHIENSE, Alexandre Vianna et al. Dosage of interlocking paving with ornamental rock waste: An experimental design approach, particle packing and polluting

potential. **Case studies in construction materials**, v. 15, p. e00596, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00596. Acesso em: 15 abr. 2024.

BACARJI E., CASCUDO O. TASSI A. A. SILVA R. V., VIRGENS J. P. **Microconcreto autoadensável com a incorporação de adições minerais. Avaliações no estado fresco.** 3° Congresso Luso-Brasileiro – Materiais de construção sustentáveis. Coimbra. 2018.

CAMPOS, Paulo Eduardo Fonseca. **Da argamassa armada ao microconcreto de alto desempenho: perspectivas de desenvolvimento para a pré-fabricação leve**. Novas Edições Acadêmicas, 2014.

ÇANKAYA, Simge; PEKEY, Beyhan. A comparative life cycle assessment for sustainable cement production in Turkey. **Journal of environmental management**, v. 249, p. 109362, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109362. Acesso em: 15 abr. 2024.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, Victor Carlos. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18-32, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003. Acesso em: 15 abr. 2024.

CASTRO, Alessandra Lorenzetti de; FERREIRA, Fernanda Giannotti da Silva. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes. **Revista de Ingenieria de Construccion**, v. 31, n. 2, p. 91-104, 2016.

CELIK, Kemal et al. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self-consolidating concrete mixtures made with blended portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59-72, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003. Acesso em: 15 abr. 2024.

CHEAH, Chee Ban; LIM, Jay Sern; RAMLI, Mahyuddin B. The mechanical strength and durability properties of ternary blended cementitious composites containing granite quarry dust (GQD) as natural sand replacement. **Construction and Building Materials**, v. 197, p. 291-306, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.194. Acesso em: 15 abr. 2024.

CHIODI FILHO, Cid. Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2008. **São Paulo: ABIROCHAS, 2009a. 23p.(Informe n. 03/2009)**, 2009.

EFNARC. **Specification and Guidelines for self-compacting concrete.** United Kingdom.2005.

FELEKOGLU B. **Efeitos do PSD e da morfologia da superfície de microagregados na exigência de mistura e desempenho mecânico do micro-**

concreto. Compósitos de cimento e concreto. Volume 29, edição 6. Julho de 2007, páginas 481-489.

FRANÇA, Fernando Cesar Coelho et al. Vigas de concreto reparadas com argamassa geopolimérica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. e12194, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0528. Acesso em: 10 abr. 2024.

FUGIYAMA, Michele Miwa et al. Estudos numérico-experimentais de vigas de concreto armado com reforço de fibra de carbono. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 04, p. e13093, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1393. Acesso em: 10 abr. 2024.

FUNK, James E.; DINGER, Dennis R. **Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing**. Springer Science & Business Media, 2013.77.

GAUTAM, Lilesh et al. Valorization of bone-china ceramic powder waste along with granite waste in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 315, p. 125730, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125730. Acesso em: 10 abr. 2024.

GESOĞLU, Mehmet et al. Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 160-170, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092. Acesso em: 10 abr. 2024.

GOMES, Paulo CC; BARROS, AR de. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. **São Paulo: Pini**, 2009.

JAIN, Abhishek et al. Abrasion resistance and sorptivity characteristics of SCC containing granite waste. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 524-528, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.318. Acesso em: 10 abr. 2024.

JAIN, Abhishek; GUPTA, Rajesh; CHAUDHARY, Sandeep. Performance of self-compacting concrete comprising granite cutting waste as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 539-552, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.104. Acesso em: 10 abr. 2024.

JAIN, Kishan Lal; SANCHETI, Gaurav; GUPTA, Lalit Kumar. Durability performance of waste granite and glass powder added concrete. **Construction and Building Materials**, v. 252, p. 119075, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119075. Acesso em: 10 abr. 2024.

KHAN, Rizwan A. Mechanical and Durability Performance of Self Compacting Concrete Containing Fly Ash and Metakaolin. **Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies**, v. 2, n. 1, p. 68-78, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.29187/jscmt.2018.9. Acesso em: 10 abr. 2024.

KITAMURA, Sérgio. **ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE A INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO NATURAL POR GRANITO TRITURADO, NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal Fluminense.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 270-277, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.022. Acesso em: 10 abr. 2024.

LONDERO, C. et al. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, v. 63, n. 365, p. 22-33, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1590/0366-69132017633652018. Acesso em: 10 abr. 2024.

LOPES, Herbert Medeiros Torres; PEÇANHA, Ana Carolina Corsi; CASTRO, Alessandra Lorenzetti de. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12549, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0874. Acesso em: 10 abr. 2024

MACHADO, Michelle; BACARJI, Edgar; CARASEK, Helena. Microconcreto autoadensável em reforços estruturais: aplicação como ponte de aderência. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 28, p. e20230007, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0007. Acesso em: 10 abr. 2024

MASHALY, Ahmed O.; SHALABY, Basel N.; RASHWAN, Mohammed A. Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 800-818, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.046. Acesso em: 10 abr. 2024.

MEDINA, G. et al. Granite quarry waste as a future eco-efficient supplementary cementitious material (SCM): Scientific and technical considerations. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 467-476, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.048. Acesso em: 10 abr. 2024.

MONTANI C. Dossiê Brasil 2019. Associação Brasileira da Indústria de Rochas ornamentais. 2019.

MOUHCINE, Ben Aicha et al. Innovative test for predicting the rheology of self compacting concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 58, p. 1020-1027, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.521. Acesso em: 10 abr. 2024.

MURTHY, N. Krishna et al. Mix Design procedure for self-compacting concrete. **IOSR Journal of Engineering**, v. 2, n. 9, p. 33-41, 2012.

OLIVEIRA, Caroline Oliveira e et al. Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho. **Matéria (rio de Janeiro)**, v. 23, n. 1, p. e-11962, 2018.Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0298. Acesso em: 10 abr. 2024.

OLIVEIRA, IR de et al. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. **São Paulo: Fazendo Arte Editorial**, v. 1, p. 224, 2000.

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. Self-compacting concrete. **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.3151/jact.1.5. Acesso em: 10 abr. 2024.

PARRA, C.; VALCUENDE, M.; GÓMEZ, F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. **Construction and Building materials**, v. 25, n. 1, p. 201-207, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037. Acesso em: 10 abr. 2024.

RANA, Aditya et al. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal of cleaner production**, v. 135, p. 312-331, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.126. Acesso em: 10 abr. 2024.

RIBEIRO, Daniel Véras; CASCUDO, Oswaldo. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. **RIBEIRO, D. V. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**, v. 1, p. 37-50, 2014.

SCHUTTER, Geert. Guidelines for testing fresh self-compacting concrete. **European research project**, 2005.

SIDDIQUE, Salman et al. Strength and impact resistance properties of concrete containing fine bone china ceramic aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 289-298, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.213. Acesso em: 10 abr. 2024.

SILVA, M. A.; PAES JR, H. R.; HOLANDA, J. N. F. Reuse of ornamental rock-cutting waste in aluminous porcelain. **Journal of environmental management**, v. 92, n. 3, p. 936-940, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.060. Acesso em: 10 abr. 2024.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117629, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629. Acesso em: 10 abr. 2024.

SILVA, Augusto Costa et al. Microconcrete of high performance: properties and behavior under combined compression and one-axis bending. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. e12161, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0495. Acesso em: 10 abr. 2024.

SINGH, Charn; AGGARWAL, Vanita. Experimental investigation of concrete strength properties by partial replacement of cement-sand with marble-granite powder. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 3734-3737, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.438. Acesso em: 10 abr. 2024.

SINGH, Sarbjeet et al. Feasibility as a potential substitute for natural sand: a comparative study between granite cutting waste and marble slurry. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 571-582, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.042. Acesso em: 10 abr. 2024.

SOUZA, Ariel Miranda et al. Application of the desirability function for the development of new composite eco-efficiency indicators for concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102374, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102374. Acesso em: 10 abr. 2024.

SOUZA, Ariel Miranda et al. Influence of filler/cement and powder/total solids on the mixture design of self-compacting micro-concretes containing waste from the ornamental stone industry. **Construction and Building Materials**, v. 407, p. 133445, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133445. Acesso em: 10 abr. 2024.

SINGH, Sarbjeet et al. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 86-98, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.008. Acesso em: 10 abr. 2024.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. Concreto auto-adensável. **São Paulo: PINI**, 2008.

ANEXO 1

A.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Essa análise avaliou a diferença de resistência à compressão entre as quatro argamassas aos 28 dias, considerando 3 repetições para cada mistura. O quadro da ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias está apresentado na Tabela A1. O teste Tukey está apresentado na Tabela A2.

Tabela A1 - DBC-ANOVA (p ≤ 0,05) para variação no módulo de resíduo de rocha ornamental.

CV	GL	SQ	QM	Fcalculado	Ftabelado
Tratamentos	3	900,42	300,14	13,46	4,53
Resíduo	8	178,34	22,29	-	-
Total	11	1078,76	98,07	-	-

Tabela A2 - Teste de Tukey para módulo de resíduo de rocha ornamental.

Módulo	Teste de Tukey
MCARG0	B
MCARG20	A
MCARG30	A
MCARG40	A
DMS	16,07

A.1.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Essa análise avaliou a diferença de resistência á tração entre as quatro argamassas aos 28 dias, considerando 3 repetições para cada mistura. O quadro da ANOVA para resistência à compressão aos 28 dias está apresentado na Tabela A3. O teste Tukey está apresentado na Tabela A4.

Tabela A3 - DBC-ANOVA (p ≤ 0,05) para variação no módulo de resíduo de rocha ornamental.

CV	GL	SQ	QM	Fcalculado	Ftabelado
Tratamentos	3	5,80	1,93	10,72	4,53
Resíduo	8	1,51	0,18	-	-
Total	11	7,31	0,66	-	-

Tabela A4 - Teste de Tukey para módulo de resíduo de rocha ornamental.

Módulo	Teste de Tukey
MCARG0	C
MCARG20	A
MCARG30	BC
MCARG40	AB
DMS	0,96

ANEXO 2

A.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO REPARO DAS VIGAS

Essa análise avaliou a diferença de resistência á compressão entre as quatro argamassas aos 90 dias, considerando 3 repetições para cada mistura. O quadro da ANOVA para resistência à compressão aos 90 dias está apresentado na Tabela A5. O teste Tukey está apresentado na Tabela A6.

Tabela A5 - DBC-ANOVA (p ≤ 0,05) para variação no módulo de resíduo de rocha ornamental.

CV	GL	SQ	QM	Fcalculado	Ftabelado
Tratamentos	3	844,78	281,59	6,59	4,53
Resíduo	8	336,42	42,05	-	-
Total	11	1.181,20	107,38	-	-

Tabela A6 - Teste de Tukey para módulo de resíduo de rocha ornamental.

Módulo	Teste de Tukey
MCARG0	B
MCARG20	A
MCARG30	A
MCARG40	A
DMS	14,67

A.2.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DO REPARO DAS VIGAS

Essa análise avaliou a diferença de resistência á tração entre as quatro argamassas aos 90 dias, considerando 3 repetições para cada mistura. O quadro da ANOVA para resistência à compressão aos 90 dias está apresentado na Tabela A7. O teste Tukey está apresentado na Tabela A8.

Tabela A7 - DBC-ANOVA (p ≤ 0,05) para variação no módulo de resíduo de rocha ornamental.

CV	GL	SQ	QM	Fcalculado	Ftabelado
Tratamentos	3	10,60	3,53	35,3	4,53
Resíduo	8	0,8	0,1	-	-
Total	11	11,40	1,03	-	-

Tabela A8 - Teste de Tukey para módulo de resíduo de rocha ornamental.

Módulo	Teste de Tukey
MCARG0	AB
MCARG20	A
MCARG30	B
MCARG40	C
DMS	0,96